

**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

Teknik och metoder för rekultivering av packningsskadad mark i urban miljö

Förstudie

**Technique and Methods for Recultivation of
Compacted Soils in Urban Areas**

Preparatory Study

Kaj Rolf

**Institutionen för
lantbruksteknik**

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural
Engineering**

**Rapport 116
Report**

Uppsala 1987

ISSN 0283-0086

ISBN 91-576-3168-9

Institution/motsvarande Institutionen för lantbruksteknik, avd. markbyggnads- och trädgårds- odlingsteknik		Dokumenttyp Projektrapport	
		Utgivningsår 1987	Ärendebeteckning
Författare/upphov Rolf, Kaj			
Dokumentets titel Tekniker och metoder för rekultivering av packningsskadad mark i urban miljö. Förstudie. Technique and Methods for Recultivation of Compacted Soils in Urban Areas. Preparatory Study.			
Referat The technical development within the buildingtrade has lead to heavier machinery and vehicles. The soil become more or less compacted during the building process, but very little has been done to eliminate the occuring damages. The report is a literature rewiev on what chances different methods have to recultivate compacted soil in urban environments. Mechanical loosening with subsoilers and excavator as well as pneumatic loose- ning with high pressures are described. The first part of the report deals with some factors that controls the root development of woody plants.			
			Målgrupp I, II
Ämnesord (AGROVOC) Soil compaction, mechanical loosening, pneumatic loosening, urban soils, root development, recultivation			
Andra ämnesord Jordpackning, mekanisk luckring, pneumatisk luckring, stadsjordar rotutveckling, packningsskador, rekultivering			
Övriga bibliografiska uppgifter			
Serie-/tidskriftstitel och volym/nr Sveriges Lantbruksuniversitet, institutionen för lantbruksteknik. Rapport 116.		ISBN 91-576-3168-9	ISSN 0283-0086
Språk svenska	Smf-språk svenska	Omfång 47 s	Pris 50:-

INNEHÅLL

	FÖRORD	3
	SAMMANFATTNING	4
1	INLEDNING	6
1.1	Problemet, dess bakgrund och avgränsning	6
1.2	Målsättning	7
2	NÅGRA FAKTORER SOM STYR ROTUTVECKLINGEN HOS VEDARTADE VÄXTER	8
2.1	Rotens byggnad	8
2.2	Rotsystemets uppbyggnad	9
2.3	Rotens energi och näringstillgång	10
2.4	Gifter och tillväxthämmande ämnen	12
2.5	Marktemperaturen	12
2.6	Markluften - syretillgången	13
2.7	Fuktighetsförhållanden - vattentillgång	14
2.7.1	Vattenmättnad - syrebrist	15
2.8	Mekaniskt motstånd	17
2.9	Jordarten	18
3	PACKAD MARK	20
3.1	Konsekvenser för växten	20
3.2	Packningsprocessen i marken	22
4	DJUPLUCKRING	25
4.1	Mål	25
4.2	Jordar i behov av luckring	25
4.3	Marktillståndet vid luckringen	26
4.4	Luckringsresultat	27
4.5	Luckringsmetoder	28
4.5.1	Luckring med mekanisk alvluckrare	28
4.5.2	Luckring med grävmaskin	34
4.5.3	Luckring med tryckluft	35
5	DISKUSSION	39
6	PROJEKTETS FORTSÄTTNING	42
	REFERENSLITTERATUR	43

FÖRORD

Institutionen för lantbruksteknik (LT), fd Arbetsmetodik och teknik, har med hjälp av forskningsanslag 860441-8 från Statens råd för byggnadsforskning utfört en litteraturstudie över tekniker och metoder för rekultivering av packningsskadad mark i urban miljö. Denna studie har legat som grund för en ansökan till Statens råd för byggnadsforskning om förnyade anslag för att försöksmässigt utvärdera några av de studerade metoderna.

Denna ansökan har beviljats och projektet fortsätter nu fram till slutet av 1989 med studier av luckring med grävmaskin samt tryckluftsluckring med Terralift-metoden. En annan viktig del av detta nya projekt är stadsträdens krav på marken och därmed förknippad anläggningsteknik.

Detta projekt och även det nu påbörjade genomförs av undertecknad med försöksledare Per Nyström som projektledare.

Jag vill tacka de på institutionen för lantbruksteknik, institutionen för landskapsplanering och institutionen för markvetenskap som hjälpt och stöttat mig med rapportering och projektansökningar utan vars hjälp jag ej haft möjlighet att få skriva detta idag.

Alnarp i september 1987

Kaj Rolf

SAMMANFATTNING

I byggprocessens olika skeden komprimeras marken både medvetet och omedvetet. Orsaken till att det uppstår bestående skador i marken är främst körning med tunga fordon och maskiner på olämpliga tidpunkter, samt att marken inte därefter återställs i ett växtvänligt skick. Växterna måste ges en god rotmiljö för att de skall kunna utvecklas. Vilka krav som vedartade växter ställer på marken varierar naturligtvis med art, men vissa markfunktioner är nödvändiga för de flesta växtslag.

När marken packas så förstörs dess grova porsystem. Dessa porer är väsentliga för gas- och vattentransporterna i marken och utan detta porsystem kommer anaeroba förhållanden att råda i marken under stora delar av växtsäsongen.

Vattenöverskottet, som är följden av en dålig genomsläpplighet, ger i sin tur syrebrist i marken, som ger följdreaktioner som sämre tålighet mot vägsalt, denitrifikation, näringsläckage från rötterna och förändringar i växtens metabolism. Det har även påvisats att vid packning uppkommer skador orsakade av kemiska och biokemiska reaktioner i marken, exempelvis bildas giftiga gaser, pH-värdet sjunker och därmed frigörs för växten giftiga ämnen.

Det mekaniska motstånd som rötterna möter i marken ökar när den packas. Rotutbredningen blir därmed sämre och den rotgenomvävda jordvolymen mindre. En mindre mängd vatten och näring blir därför disponibel för växten.

För att undvika bestående markskador bör körning inte ske när marken är våt. Vid normal fuktighet i marken bör axelbelastningen inte överstiga 6 ton och lufttrycket i däcken inte vara högre än 80-100 kPa.

Där packningsskador finns och, de finns på de flesta byggarbetsplatser, måste marken luckras före plantering. Vid all luckring måste följande faktorer beaktas:

- * vattenhalten i jorden vid bearbetningstillfället
- * det fackmässiga genomförandet
- * utrustningens ändamålsenlighet
- * kapaciteten på redskapen man använder
- * dränering, när grundvattenytan står för högt
- * vattenhalten i jorden vid efterföljande markarbeten (beakta risken för skadlig återpackning)
- * att ytan planteras eller besås snarast, så att växterna hjälper till med upptorkningsförloppet

Försök med mekanisk alvluckrare visar både goda och dåliga resultat av behandlingen. Luckringens effektivitet är mycket beroende av vattenhalten i marken, varför den är mindre lämplig att använda i urbana sammanhang, där luckringen måste göras vid rätt tidpunkt i byggprocessen och inte när marken är som mest lämpad för det. För att en mekanisk luckring med alvluckrare skall ge ett bra resultat krävs en god kännedom om mark och markens egenskaper. Denna kunskap finns idag inte hos entreprenörerna.

Luckring med grävmaskin har i de få undersökningar som utförts

givit goda resultat på mark och växtlighet. Metoden som bör lämpa sig väl för stadsbruket bör dock studeras i kontrollerade försök för att få mer säkra och omfattande resultat, som underlag till beskrivningsanvisningar i bl a Mark-Ama.

Försök att använda tryckluft för att luckra marken vid etablerade träd gjordes redan på 60-talet, men först på senare år har en praktiskt användbar utrustning kommit ut på marknaden. Metoden, som är en form av 'sprängning' i marken, visar goda resultat vad gäller genomsläpplighet för luft och vatten. Problemet med denna typ av luckring, liksom med de flesta andra luckringsmetoder, är att få en stabilisering av det nya spricksystemet så att verkan kvarstår under en längre tidsperiod.

Tryckluftstekniken syns idag vara den enda metoden som har en verklig möjlighet att förbättra markförhållandena i etablerad vegetation och då speciellt vid vården av stadsträd. Behandlingens varaktighet är dåligt dokumenterad och bör studeras mer, liksom metodens beroende av vattenhalten i marken vid behandlingstillfället.

Olika markbehandlingars resultat måste hela tiden ställas till vegetationens krav. Det är emellertid svårt att mäta växternas krav och det är därmed en långsiktig process att ta fram vilka parametrar som är viktiga att uppfylla. Studier av markens reaktioner på skilda behandlingar måste även innehålla studier av vedartade växters reaktioner så att utvecklingen av gamla och nya metoder för markbehandling verkligen kommer växten till nytta.

1 INLEDNING

1.1 Problemet

En väl fungerande fysikalisk, kemisk och biologisk miljö är en grundförutsättning för att växter skall utvecklas på ett för varje art riktigt sätt. Marken utgör en grundresurs för växterna och studiet av markens betydelse för växten är viktig för att förstå dess utveckling.

Marken i urban miljö påverkas i regel kraftigt under byggprocessens olika skeden. Jord transporteras, läggs i upplag, blandas med andra material, bearbetas och används som underlag för tung trafik. Under dessa arbeten påverkas jordens fysikaliska, kemiska och biologiska status.

I urbana sammanhang har väldigt lite uppmärksamhet ägnats åt växternas markfysikaliska miljö. Växternas dåliga tillväxt har observerats, men motåtgärderna har till största delen baserats på gissningar och antaganden. Till exempel skyller man ofta på att det är fel på växtmaterialet och dess hanterande eller på att jordens näringsinnehåll är i obalans.

De senaste 30 årens utveckling inom byggteknikområdet har gjort att fler maskiner används och dessa har blivit både större och tyngre. På sina håll används t.o.m vägbyggnadsteknik på blivande grönytor dvs jorden läggs ut i skikt som dessutom packas.

Denna tekniska utveckling har medfört att marken packas i allt högre grad. Det har uppstått strukturförändringar i marken som gör att det planterade växtmaterialet inte får de rätta markfysikaliska förhållandena. Vattnets transport genom marken och rötternas förmåga att ta sig fram har begränsats. Vattenöverskottet som uppstår ger i sin tur syrebrist i marken, som ofta ger följdreaktioner som är skadliga för växten.

Problemet med packad mark finns hos de flesta förvaltare av grönytor inom den urbana miljön och det finns anledning att anta att dessa packningsskador indirekt kostar en hel del pengar, i form av att det uppsatta målet för anläggningen inte nås, insatser i form av dränering, gödsling, ökad ogräsbekämpning osv som inte åtgärdar orsakerna utan endast symptom på problemen. Den ej tillfredsställande miljön kan också skapa missnöje hos de boende och vegetationen är ej stark nog att motstå slitage, vilket gör boendemiljön än sämre.

Den markfysikaliska forskningen kan visa orsakerna och det gäller att finna och utvärdera metoder, som kan åtgärda packningsskadorna eftersom naturens återställande av skadorna tar mycket lång tid. Det är därför angeläget att få fram metoder att snabbt åtgärda skadorna. En hel del kunskap om packning och packningsskador finns redan inom jordbruksområdet på Sveriges lantbruksuniversitet. Denna kunskap behöver utvärderas och ev omformas för att kunna tillämpas även inom urban miljö med dess vegetation.

Troligtvis blir packningsgraden högre i urban miljö än på jordbruksmark, beroende på tyngre maskiner och en annorlunda packningsprocess där marken knådas mer, men framförallt finns det ingen möjlighet att till rimligt pris, mekaniskt åtgärda skador på stora ytor efter att ytan är planterad. Inom lantbruket finns

den möjligheten efter varje skörd.

Det finns tre tillfällen där åtgärder kan sättas in för att häva packningen:

- a) I nyanläggning med mek. luckring eller tryckluft
- b) ROT och miljöförbättringar med mek. luckring eller tryckluft
- c) I befintliga anläggningar med tryckluftsteknik

1.2 Målsättning

Målsättningen med denna förstudie är:

- att studera och utvärdera olika metoders och utrusningars möjligheter att rekultivera mark med packningsskador.
- att utvidga kunskapen om trädens och andra vedartade växters rotfunktioner. Rötternas krav är basen för vilka åtgärder som är lämpliga.
- att undersöka behovet av konkreta försök med teknik för rekultivering av packningsskadad mark, för att ta fram:
 - a) metoder för åtgärder vid nyanläggning, ROT och miljöförbättringar
 - b) metoder för åtgärder efter anläggning i befintliga grönytor

Dessa rekultiveringsmetoder skall användas för att undvika den dåliga vegetationsutveckling som idag finns på packningsskadad mark och därmed ge en bättre vegetation med lägre underhållskostnader.

2 NÅGRA FAKTORER SOM STYR ROTUTVECKLINGEN HOS VEDARTADE VÄXTER.

Trädrötter, liksom andra rötter, växer i marken, på marken, i vatten och i luften, bara de rätta levnadsbetingelserna uppfylls. Undantaget de först bildade rötterna, som svarar på jordens dragningskraft, så växer inte rötter mot någonting i någon speciell riktning. Rottillväxten sker där omgivningen är fördelaktig, d v s där det finns plats, näring, vatten och syre. Att rötterna fungerar som de skall är lika viktigt för fotosyntesen och andra livsprocesser i växten som att bladverket bidrar med sin del. Rötterna svarar för upptagningen av för växten viktiga näringsämnen, syrgas och vatten.

Tillväxten hos en planta är ett integrerat fenomen som är beroende av en bra balans och funktion hos växtens alla delar. Om en stor del av rötterna dör, så kommer en motsvarande del av bladverk och grenar att dö. Om ett träd avlövas upprepade gånger, så kommer en del av trädets rötter att dö. Det finns alltid ett samband och ett transportsystem, mellan yttersta rotspetsen och trädtoppen.

Sambandet mellan rötter och blad varierar beroende på art. Om rötter skadas eller dör t ex genom att marken packas på en sida av ett träd, kan vissa arter skadas så att motsvarande sida av grenverket dör, medan det hos andra arter ger skador var som helst i kronan. Hur de här mönstren för sambandet mellan rot och grenverk ser ut, d v s transporterna av näringsämnen och assimilationsprodukter är för de flesta arter okänt. Det är dock, om möjligt, viktigt att kunna förutse skador som kan resultera i att halva kronan hos ett träd dör.

Ett trädets rotsystem kan bestå av flera hundra kilometer sammanlagd rotlängd. Hundratusentals rotspetsar kan, oftast med hjälp av mykorrhiza, effektivt utnyttja markens vatten- och näringsinnehåll. Flera författare (Perry, 1982) har visat att 99 % av rotsystemet befinner sig i den överst metern av jordlagret varav 60-80 % av rotvolymen finns i de översta 20 cm (Ruark et al, 1982). Orsakerna till hur djupt rotsystemet utbreder sig är många och kommer att diskuteras ingående senare, men det är dock viktigt att redan här påpeka, att rotsystemets mest aktiva delar befinner sig i det allra översta jordlagret vilket gör rotsystemet mycket känsligt när jorden packas, översvämmas eller bearbetas.

2.1 Rotens byggnad.

En rots byggnad och funktion förändras med tiden. De växande rotspetsarna omges av en s.k. rotmössa. Denna bildas från rotspetsen och skyddar den framträngande roten från mekanisk skada. Rotmössan avskärmar ett kolhydratrikt slem som i första hand underlättar rotens framträngande och ökar kontaktytan mellan roten och markpartiklarna.

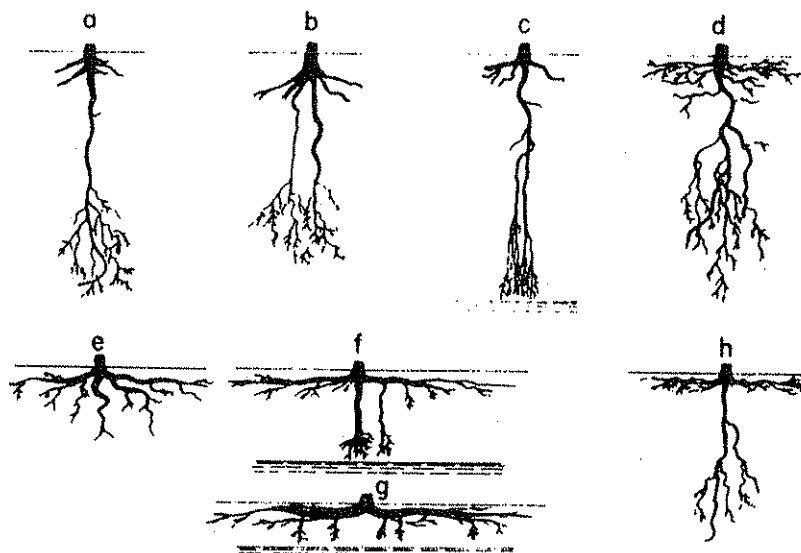
Rothår bildas hos många arter i stort antal, som hårkärllika utväxter från rotens hudceller, någon millimeter bakom rotspetsen. Rothårsszonen varierar i längd, från några millimeter till flera centimeter, beroende på växtart och den miljö som roten utvecklas i.

Rothårens största betydelse anses vara att med ringa energiåtgång öka den yta som absorberar vatten och näringsämnen. Rothårens förmåga att förankra roten kan vara viktig då rotspetsen tränger fram genom en svårpenetrerad jord.

Vatten tas upp från jorden framför allt genom rothåren och cellsträckningszonen bakom rotspetsen även om den absorberande ytan hos den sistnämnda är mycket mindre än hos rothåren. Rothåren blir inte rötter och hos de flesta arter lever de endast ett par veckor. Rothåren hos vissa arter som *Gleditsia triacanthos* och *Cercis* kan emellertid överleva i mer än ett år medan vissa barrträdsarter har få eller helt saknar rothår. (Harris, 1983)

2.2 Rotsystemets uppbyggnad.

En växts uppbyggnad såväl över som under markytan, bestäms av det ärftliga reglaget. Detta är enklare för roten än för skottet, vilket betyder att roten styrs förhållandevis mer av miljön (figur 2.1). Varje art har dock sin grundprofil, även vad avser rotsystemets uppbyggnad.



Figur 2.1. Ståndortens inverkan på rotsystemets utseende. (a, b) Pålrötter och hjärtrötter med svagt utbildat övre rotsystem; grova sandjordar som underlagras av finare jord. (c) Djupgående rotsystem med på djupet utbildade finrötter orsakat av långsam kapillär stigning. (d) Ytligt och djupt utbildat finrotsystem orsakat av ett mellanliggande lager av poröst material. (e) Flackt hjärtrotsystem utvecklat i en lerjord som överlagras sand. (f) Flackt rotsystem utvecklat i en jord med djupt stående grundvattenyta. (g) Flackt rotsystem i en organisk jord med ytligt stående grundvattenyta. (h) Rotsystem utvecklat i en urlakningsjordmån rik på organiskt material i ytan. (Ur Kozlowski, 1971)

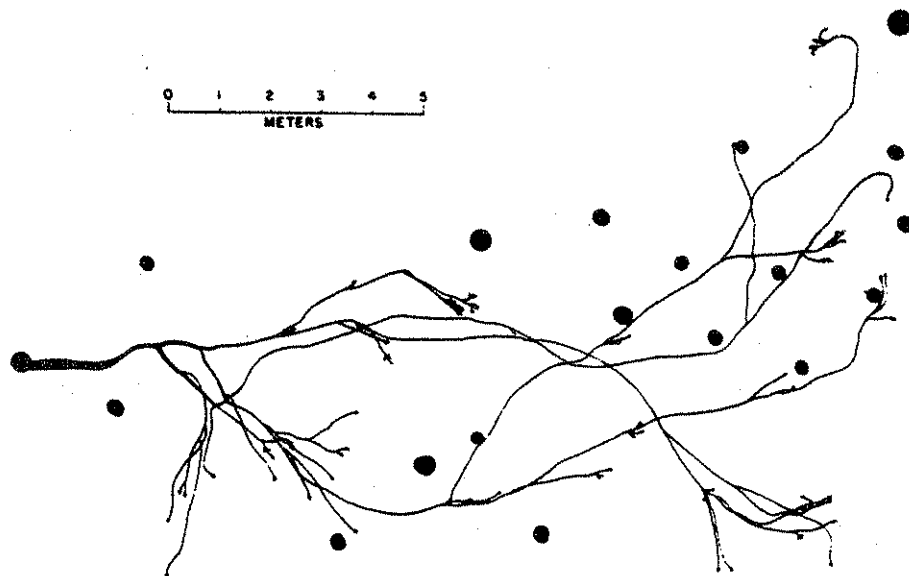
Dikotyledonerna (tvåhjärtbladiga växter) har alla en primärrot, från vilken rötter av högre ordning normalt måste utgå. För denna primärrot dominera, d v s när konkurrensen om energi med sekundära rotanlag undertrycks i en tidig utvecklingsfas så bildas en pålrot med möjlighet att relativt snabbt tränga ner till djupare

markzoner. Så sker oftast hos ek och tall, vars pålrot kan gå ner 2 meter eller mer i marken, eller tills syrebristen eller det mekaniska motståndet blir begränsande för tillväxten.

Hos andra arter, som gran, sälg och poppel, överlever inte primärroten, utan ett system av fina rötter dominerar den tidiga utvecklingen.

De flesta trädarter utvecklar 4 - 11 kraftiga huvudrötter, som växer horisontellt i marken. Dessa rötter förgrenar sig 1 - 4 meter från stambasen och utvecklar ett brett nätverk av långa, replika rötter, som är 10-25 millimeter i diameter (figur 2.2). Från dessa rötter växer ett komplext system av små, tunna rötter. Dessa växer huvudsakligen uppåt från huvudrötterna för att utgöra den stora massan av närings- och vattenupptagande rötter. Dessa blott 1 millimeter stora rötter befinner sig i de översta centimeterna av jordlagret och är därför känsliga för uttorkning och frost, men efterhand som de dör ersätts de av nya.

Ett trädets rotsystem kan ta stora ytor i anspråk. Ett stort lövträds rotsystem kan uppta en yta som är upp till 7 gånger större än trädets kronprojektion på marken. (Perry, 1982)



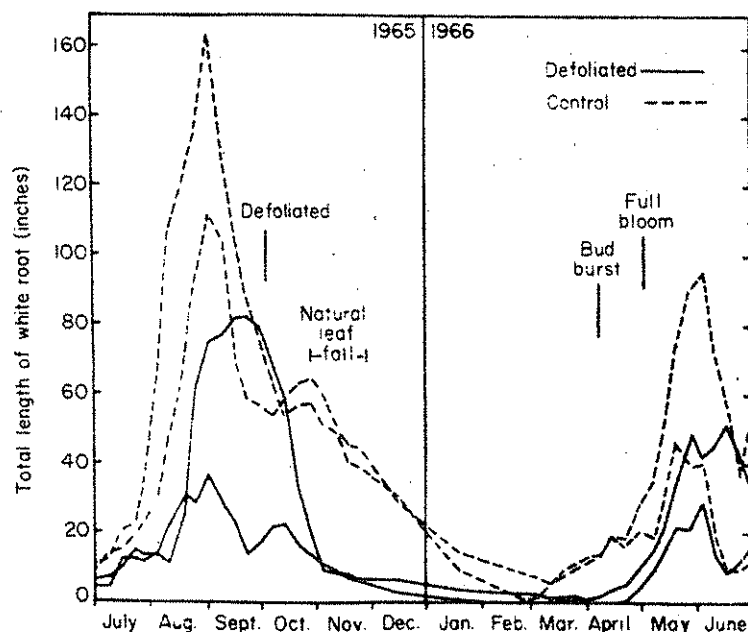
Figur 2.2. Plan över hur en horisontell rot kan breda ut sig i ett bestånd. De mörka punkterna visar positionen för andra träd i beståndet. (Ur Perry, 1982)

2.3 Rotens energi och näringstillgång.

För att roten skall kunna växa måste den få tillgång till energi, näring och vatten. Som tidigare nämnts råder ett nära samspel mellan rot och ovanjordiska delar. Roten är beroende av tillförsel av assimilat från fotosyntesen för att kunna utvecklas. Head (1969) visade hur rottillväxten minskar, när man avlövar ett träd före det naturliga lövfallet, se figur 2.3. Detsamma blir fallet om starka insektsangrepp svårt skadar lövverket.

Fotosyntesens effektivitet är alltså viktig för rottillväxten. Indirekt har därför ljusförhållandena, som växten utsätts för, en inverkan på rotutvecklingen. Kozłowski (1949) visade hur olika arter kan utnyttja ljusmängden. Hos tall (*Pinus taeda*) var det en

markant skillnad mellan exemplar som vuxit i fullt ljus och sådana som vuxit i skugga. Ek (*Quercus lyrata*) däremot, utvecklade nästan lika stora rotsystem, oavsett om de vuxit i sol eller skugga.



Figur 2.3. Avlövningsseffekt på rotsystemet hos äppleträd. (Ur Kozlowski, 1971, sid 199)

Rotbildning och rottillväxt styrs även av den kolhydratdepå som växten lagrat samt av hormoniella faktorer (Richardson, 1953, 1957). Rotsystemets utseende som funktion av näringsförhållandena i marken, har bl.a studerats av Drew & Saker (1975). Figur 2.4 visar tydligt hur en lokal koncentration av näringsämnen gör att rotsystemet får en större förgrening och tillväxt. Växten optimerar rotsystemet där det finns gott om näring. Ruark et al (1982) påtalar också att rotsystemet har en större förgrening i kolloidrika horisonter i annars näringsfattiga jordar. Samma sak ser man i skogsmark, där trädens ytliga rötter är väl förgrenade och många till antalet. De växer i den näringsrikaste zonen under eller i förnan.



Figur 2.4. Näringskoncentration ger en större rotförgrening.

2.4 Gifter och tillväxthämmande ämnen.

Träd i stadsmiljö är mycket utsatta för stress på rotsystemet. De utsätts för giftiga kemikalier, vägsalt, oljor och syntetiska rengöringsmedel (Perry, 1982).

Största delen av det aktiva rotsystemet befinner sig nära markytan och rötterna växer invävda i humuslagret eller gräsens rotsystem. Detta innebär att rötterna kan träffas av herbicider och andra kemikalier.

Leone et. al. (1977) visar ett klart samband mellan förekomsten av metangas och andra giftiga gaser och utveckling och överlevnad hos trädarter. Endast arter som kan transportera syre till rotsystemet eller i övrigt tål anaeroba förhållanden överlevde.

pH-värdet i marken inverkar på flera sätt på rotsystemets utveckling. I urbana jordar förekommer både för höga och för låga pH-värden (Patterson, 1976; Craul, 1985). Detta påverkar näringsämnenas tillgänglighet vilket indirekt styr växtens och rotsystemets utveckling. I starkt sura jordar kan aluminiumjoner frigöras och dessa är direkt skadliga för de flesta växter.

Förekomsten av olika tillväxthämmande ämnen i marken är ofta ett resultat av dålig syretillgång och behandlas utförligare längre fram.

2.5 Marktemperaturen.

Marktemperaturen styr i större eller mindre grad de kemiska, fysikaliska och biologiska processerna i marken. Nedbrytningen av den organiska substansen, mineraliseringen av t ex kväve och diffusionshastigheten hos gaser ökar med temperaturen och många mikrobiologiska processer sker under, för varje process optimala temperaturförhållanden.

Jordarten och de vattenhållande egenskaperna har betydelse för hur snabbt en jord värms upp. En våt jord behöver mer värme för att höja temperaturen än en torr jord. Ler- och torvjordar är kalla jordar som värms upp långsamt medan sandjordar får en snabbare temperaturstegring men även en snabbare temperatur-sänkning.

Markens temperatur påverkar växtens rotbildning och rotutveckling. Låga temperaturer gör att växten bildar vita sugrötter som förvedas långsamt och har svag förgrening, medan höga temperaturer inducerar ett finare och mer förgrenat rotsystem, som förvedas snabbare.

Rötternas förmåga att ta upp vatten och näring påskyndas vid högre temperatur (Russel, 1973, s 401-402). Ett välkänt fenomen av skilda mark- och lufttemperaturer utgör torkskador på barrväxter på våren. Marktemperaturen är för låg för att rotsystemet skall kunna ta upp tillräckligt med vatten för att kompensera förlusterna vid avdunstningen, när vårsolen värmer upp plantans ovanjordiska delar. Vattnet har en högre viskositet vid lägre temperatur, samtidigt som protoplasman är mindre permeabel.

Marktäckning med isolerande material hindrar den direkta solinstrålningen till jorden vilket, speciellt på våren, medför lägre

marktemperaturer. Marktäckningen ger emellertid en dämpning av temperaturvariationerna under året med det resultatet att det blir en förskjutning av de cykliska temperaturvariationerna. Detta innebär att växten startar senare på våren och att rottillväxten avtar senare på hösten.

2.6 Markluften - syretillgången

Markluften är väsentlig för de biologiska och kemiska markprocesserna. Utbredningen av växternas rotsystem, rötternas andning och näringsupptagning och markdjurens förekomst är direkt förknippade med markluftens mängd och sammansättning.

Rotandningen och den aeroba nedbrytningen av organiskt material förbrukar syre och avger koldioxid. I en väl genomluftad jord är kvoten mellan producerad mängd koldioxid och konsumerad mängd syrgas ungefär ett. Kvoten stiger över ett när anaeroba processer äger rum i jorden (Russel, 1973, s 403-405).

När en otillräcklig mängd syrgas finns i marken blir rotandningen ineffektiv och frigör inte tillräckligt med energi för att upprätthålla väsentliga rotfunktioner som t.ex. näringsupptagningen. Syrebrist påverkar också rotcellernas membran så att joner kan lämna roten som läckage. (Rosen & Carlsson, 1984)

Markluftens mängd beror av den totala porvolymen och markens aktuella fuktighetstillstånd, d v s andelen luftfyllda porer.

Markluftens sammansättning beror i första hand på de biologiska processernas aktivitet och hur intensivt utbytet är mellan markluften och atmosfären. Produktionen och borttransporten av koldioxid och ersättningen av konsumerad syrgas varierar kontinuerligt med varje förändring i struktur, vattenhalt och temperatur i marken.

Under perioder med god genomluftning i marken så kommer minskningen i syrgaskoncentration att vara numeriskt lika med ökningen av koldioxidkoncentration men vid sämre genomluftning är syrgasminskningen större (Wood & Greenwood, 1971).

Luften ovanför markytan innehåller ungefär 21 % syre, 78 % kväve och bara 0.03 % koldioxid. Markluften innehåller mindre syre och mer koldioxid än atmosfärluften och koldioxidhalten ökar med ökat djup i marken. Markluftens sammansättning förändras även med årstiderna, beroende på aktiviteten i marken (Kozlowski, 1985). Koldioxidhalten är högst på sommaren, mindre på hösten, ännu lägre på våren och lägst under vintern.

Om andelen luftfyllda porer är liten, så uppstår syrebrist i marken. Detta kan bero på att porsystemet saknar grova porer som har förbindelse med atmosfären eller att vattenhalten i marken är för hög.

Flera forskare har försökt finna vid vilken porvolym eller syrehalt i marken som tillväxten hos växterna påverkas negativt. Richards och Cockroft (1974) fann att rottillväxten hämmades när den luftfyllda porvolymen var mindre än 15 %. Rottillväxten upphörde när den luftfyllda porvolymen sjönk till 2 %. Bakker och Hidding (1970) kom fram till att 20 % luftfyllda porer behövs för att ett tillräckligt gasutbyte mellan atmosfär och mark skall

kunna ske. Andra har funnit att syreinnehåll, lägre än 10 % allvarligt minskar trädets tillväxt, som t ex *Pinus silvestris*, *Picea abies* (Youngberg, 1970) och *Pinus contorta* (Lees, 1972). Skillnaderna i resultat kan orsakas av att det aktuella värdet beror av jordarten och av skilda mätmetoder.

Nästan all gastransport i marken sker genom diffusion och med det menas att atomer och molekyler rör sig med hjälp av deras kinetiska energi varvid de strävar efter att utjämna förekommande koncentrationsskillnader.

Flera faktorer påverkar diffusionshastigheten hos gaser. Temperaturen är redan nämnd och i övrigt påverkar de diffunderande gasernas densitet, mediet i vilket diffusionen föregår och diffusionstrycksgradienten $d v s$ skillnaden i koncentration mellan den plats där gaserna finns och dit de diffunderar. (Nilsson, 1975)

Levande vävnad som är beroende av en konstant tillgång av syre utgör i sig själv en diffusionsbarriär som är fyra gånger så stor som vatten. När celler eller vävnader är små eller tunna är diffusionsvägen kort. I tjockare vävnad behövs en mycket högre syrgaskoncentration i omgivningen för att säkra en tillräcklig tillförsel. Diffusionsprocessen inuti roten kan vara en begränsande faktor i rotandningen även när syrgaskoncentrationen är tillräcklig på rotens yta. Koncentrationen utanför roten måste dock vara högre än ett "kritiskt värde" för att tillfredsställa rotrespirationens behov (Lemon, 1962)

Det går inte att ge något generellt gällande värde för vilken syrgaskoncentration i markluften som är kritisk för rotens tillväxt, eftersom olika parametrar är inkopplade.

Det kritiska värdet beror bl a av syrgasförbrukningshastigheten i rotvävnaden, rotens diameter (varierar med art) och tjockleken på den vattenmättade zonen runt roten, som varierar med markens struktur och vattenhalt.

Syrets diffusionshastighet (ODR - oxygen diffusion rate) utgör också ett värde på tillgången i marken och utgör syrets diffusionshastighet i vätskefasen. Letey et al (1961, 1962,b) fann att rottillväxten avstannar när ODR värdet är lägre än $15-20 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Höga koldioxidhalter verkar minska rotandningen. Det råder delade meningar även här om vilka halter som är skadliga, men det rothämmande värdet ligger någonstans mellan 5-15 vol-%. Värdet är beroende av samma faktorer som nämnts ovan i fråga om syrgas. Grable (1966) och Kramer (1969) har emellertid visat att under anaeroba förhållanden är det snarare syrebristen, än koldioxidöverskottet, som begränsar tillväxten.

Dålig genomluftning och därmed syretillgång påverkar högre växter på åtminstone fyra sätt: a) plantans tillväxt, speciellt rötternas minskar; b) rötternas upptagning av näringsämnen minskar liksom c) upptagningen av vatten; och d) bildningen i marken av vissa oorganiska ämnen, som är giftiga för växten, gynnas av dålig genomluftning.

2.7 Fuktighetsförhållanden - vattentillgång.

Så gott som all vattenupptagningen sker under normala förhållanden genom växtens rötter. Rothårszonen är den del av roten där den största vattenupptagningen föregår. Vattnet diffunderar in i rothåren på grund av en skillnad i vattenpotential mellan rot och omgivande markvätska. Sjunker vattenpotentialen i rotcellerna så ökar vattenupptagningen. Om däremot det omvända skulle inträffa, att vattenpotentialen blir högre i roten än i markvätskan så diffunderar vatten ut ur roten.

Självfallet måste vattnet transporteras bort från roten, om vattenupptagningen skall kunna fortgå under en längre tid. Drivkraften för denna transport är transpirationen från de ovanjordiska delarna av växten som åstadkommer ett negativt tryck i xylemet, vilket vidarebefodras genom stammen ned till rötterna. Vattenupptagningsbehovet styrs alltså av skottet, medan roten huvudsakligen fungerar som en absorptionsyta.

Vattenhalten i marken påverkar det motstånd som marken ger de växande rotspetsarna. En rotspets kan utvidga en por till en viss del, d v s flytta markpartiklarna. I en torr jord är friktionen mellan markpartiklarna större än i en våt och därmed har roten svårare att tränga fram. Detta är naturligtvis även beroende av jordarten där en lera kan ha bredare sprickor i torrt tillstånd än i vått beroende på krympning. Hur det mekaniska motståndet påverkar roten behandlas utförligare längre fram.

Klimatet påverkar vattenhalten i markens olika skikt. I områden med längre torkperioder utvecklar växten ett djupare rotsystem för att trygga vattenförsörjningen om inte den kapillära upptransporten är tillräcklig.

I naturliga jordar är den grundläggande orsaken till rötternas utbredning, speciellt på djupet, variationer i vattentillgång. En arts förmåga att utveckla djupgående rötter, kan vara det som avgör om arten är torktolerant eller ej.

2.7.1 Vattenmättnad - syrebrist.

Att beskriva effekterna av översvämning, vattenmättnad eller stående ytvatten är viktigt då det är den miljö som växten utsätts för när marken är packad. Syrgasdiffusionen sker 10000 gånger snabbare i luft än i vatten och syrebrist för rötterna är därför ofta förenat med våta jordar. Dålig genomsläpplighet skapar vattensjuka jordar och för att förstå växtens krav måste man förstå vad som sker i växten när den stressas på olika sätt.

Alla växande plantor har ett behov av snabbt gasutbyte med sin omgivning och en tillräcklig vattenförsörjning för att tillfredställa behovet för tillväxt och avdunstning. För lite av det ena eller det andra, orsakat av för mycket eller för lite vatten i marken, leder till att plantan stressas vilket ger minskad tillväxt eller i värsta fall en för tidig död. För mycket vatten i rotens omgivning orsakar stress genom att gasdiffusionen till stor del försvåras och de biologiska processer som är baserade på syretillgång helt enkelt kvävs.

Vid vattenmättnad kan mycket lite syrgas tillföras markens porer och en ringa mängd koldioxid kan försvinna till atmosfären. Detta

gör att det bildas metangas, etylengas och många organiska syror som är giftiga för växten, kvävet i marken reduceras (denitrifikation) och näringsämnen kan läcka ut ur roten.

Vattenmättade zoner i marken kan också göra att rötternas tillväxtriktning ändras. Istället för att växa neråt får de en horisontell eller uppåtriktad tillväxt när de kommer i kontakt med en vattenyta.

Många laboratoriesundersökningar har visat att en minskad syrehalt i rotens miljö kan orsaka skader på roten eller t o m växtens död, men detta behöver nödvändigtvis inte bero på en för liten mängd syre. Syrebrist ger upphov till en hel del kemiska och biokemiska reaktioner i marken. Olika föreningar reduceras kemiskt, och detta kan ge upphov till koncentrationer av vissa joner som är skadliga för rotmetabolismen. Anaerob metabolism i rötter kan också skapa produkter som i stora mängder är skadliga för hela växtens metabolism. Läckage och denitrifikation, d v s då nitrat reduceras till kvävgas, kan kraftigt minska kvävemängden i marken (Jackson & Drew, 1984)

En del högre växters organ kan tåla anaeroba förhållanden under perioder från några timmar till flera månader. Detta motsvarar den tid som den mitokondriska strukturen kan motstå en irreversibel degenerering. Tillväxten kan inte fortgå hos högre växter under anoxi, dvs syrebrist i vävnaderna, utom hos några högt specialiserade växter som t ex ris (*Oryza sativa*), vilka har speciella organ för syretransport mm (Jackson & Drew, 1984).

Flera undersökningar har visat att i plantan, i en vattenmättad jord, sänks koncentrationen av kväve, fosfor och kalium i skotten. Rotandning blir nedsatt vid dålig syretillgång och därför minskar rotens aktiva näringsupptagning. Effekten är emellertid inte densamma för alla joner, eftersom relationen mellan aktiv och passiv upptagning är olika för varje jon.

Chang & Loomis (1945) beskriver en minskad effekt enligt $K > N > P > Ca > Mg$. Harris & van Bavel (1957) fann nästan samma ordning utom för Mg-upptagningen som de fann aningen högre än Ca-upptagningen. Labanouskas et al (1971) fann lägre innehåll av N, P, K, Ca, Mg, Zn och Fe i plantan under dåliga syreförhållanden. De fann också högre halter än normalt av Na, Cl, Ca och B. Under normala syreförhållanden blir dessa joner bortstötta av plantan, men eftersom denna process kräver energi, kan den bli störd vid dålig genomluftning av marken. Samma slutsatser vad gäller Na har även Letey et al (1962a) kommit fram till.

Hoeks (1972) återger holländska undersökningar av hur rötterna påverkas av anaeroba förhållanden. Han rapporterar om hur rotsystemets tolerans varierar under året. På vintern klarade rotsystemet hos äppleträd 6 veckor med översvämning utan att skadas medan rötter dog redan efter 3 dagars översvämning på sommaren.

Syrebrist är speciellt kännbart för växter under dess tidiga utveckling, d v s direkt efter att ett frö har grott. Speciellt cellsträckningen påverkas. Även unga plantor, utan ett väl utvecklat rotsystem, är känsliga och eftersom plantan måste utveckla nya rötter på våren så kommer en syrebrist att vara speciellt skadlig under denna period. (Hoeks 1972)

Vid dålig genomluftning av marken så minskar både vattenupptag-

ningen och avdunstningen hos växten. Vid begynnande syrebrist minskar vattenupptagningen på grund av en minskning i permeabiliteten hos rotvävnaderna, speciellt endodermis. Detta kan bero på koldioxidens speciella roll. Surheten, viskositeten och permeabiliteten hos cellplasman påverkas vid höga koldioxidhalter.

Bristande syretillgång, orsakad av för riklig vattentillgång, kan ge den effekten att roten inte kan ta upp vatten. Syrebristen ger, som nämnts ovan, en bristande rotaktivitet och ger den något ironiska effekten att för mycket vatten hindrar vattenupptagningen och växten visar symptom på vattenbrist. (Brady, 1974)

Minskningar i vattenupptagning påverkar också upptagningen av näringsämnen eftersom jonerna till viss del transporteras in i rötterna med massflödet av vatten. Det är emellertid osäkert om rotens vattenupptagning är detsamma som rotens näringsupptagning, då dessa funktioner kan skötas av skilda delar av rotsystemet. Det går därför inte att generellt säga hur en minskning i rotens vattenupptagning påverkar dess upptagning av näringsämnen.

2.8 Mekaniskt motstånd.

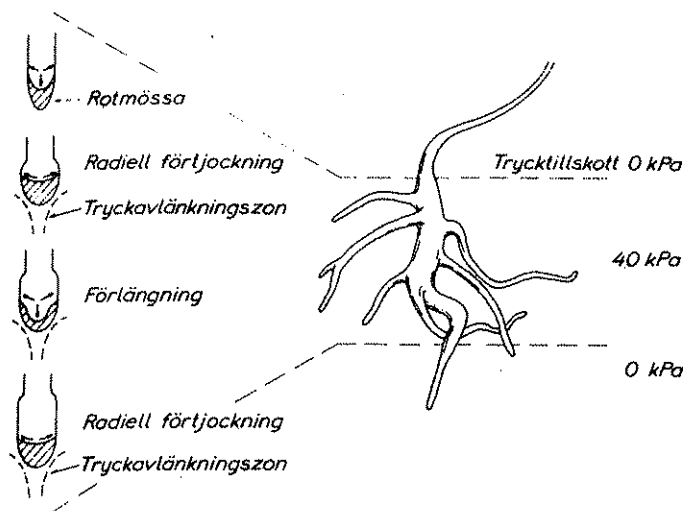
Det är inte enkelt att på ett meningsfullt sätt karakterisera varken det mekaniska motstånd, som en rotspets möter i jorden, eller rotspetsens reaktioner och möjligheter att övervinna motståndet. Markens mekaniska egenskaper varierar med vattenhalten och en avtagande vattenhalt medför normalt, att marken blir hårdare och motståndet mot rötternas framträngande ökar. Med avtagande vattenhalt ökar också det vattenbindande trycket i marken, vilket gör att rötternas förmåga att övervinna motståndet minskar.

Det mekaniska motstånd som en jord erbjuder mot rotspetsen är bl a kopplat till jordens textur, struktur, täthet och vattenhalt. De större sprickorna och kanalerna ger helt fri rottillväxt, och Wiersum (1957) visade, att i ett stelt system kan rotspetsarna ej tränga in i porer, som har mindre diameter än de själva. Allteftersom pordiametern närmar sig rotdiametern kommer porens slingrighet och markskelettets fasthet därmed att inverka på rottillväxten. (Eriksson, 1982)

Tillväxttrycket, som gör det möjligt för rötterna att övervinna ett visst penetrationsmotstånd hos marken, bestäms av cellernas maximala turgortryck. Tryckets övre gräns ligger omkring 1000 kPa och varierar relativt litet mellan olika växtarter (Heinonen, 1983). Detta hydrostatiska tryck inuti cellerna bestäms i sin tur av det osmotiska värdet för cellinnehållet men också av det vattenbindande trycket i det omgivande mediet. (Håkansson, 1983)

Det är mycket svårt att på ett riktigt sätt mäta upp det mekaniska motstånd, som rötterna möter, eller annorlunda uttryckt, det tryck som rötterna måste utöva för att kunna tränga fram i ett visst medium. Mer eller mindre relativa värden kan dock fås med penetrometrar av olika slag. Mätvärdena beror bl a på penetrometerns diameter, spetsvinkel och framdrivningshastighet och kan endast ge grova, relativa mått på markens motstånd mot en rotspets. Med en penetrometer mäter man bara i en förutbestämd riktning, vanligen vertikal, medan rotspetsen inom vissa gränser kan böja av och ta sig förbi hinder (Håkansson, 1983).

Rotspetsens tvärsnittsyta varierar mycket mellan olika växtarter, och enligt markmekanikens lagar bör en tjock rot i massiv jord ha bättre penetrationsförmåga än en fin rot med samma specifika tillväxttryck. Förklaringen är att ett penetrerande föremål p g a jordens hållfasthet alltid bryter jord även en bit utanför tryckytan, och denna kanteffekts relativa betydelse för motståndet minskar när tryckytan växer. Tjockare rötter är också styvare och blir bättre förankrade i den omgivande jorden, vilket förbättrar penetrationsförmågan. En vanlig anpassningsmekanism hos rötter som möter ett hårdare jordlager är just en tjockleksökning ovanför spetsen, se figur 2.5. Den sekundära radiella expansionen kan också förväntas ha en kilverkan som underlättar penetreringen. Tunna och oförgrenade rötter har dock den fördelen att de behöver mindre byggnadsmaterial och utrymme och kan utnyttja de mindre porer som finns. (Heinonen, 1983)



Figur 2.5. Rotens reaktion vid förhöjt jordmotstånd, dels radiell förtjockning som åstadkommer tryckavläkning framför rotspetsen, dels stark förgrening varigenom någon gren kan finna en väg med lägre motstånd. (ur Eriksson et al, 1974)

Rötternas tillväxthastighet går ner, när rotspetsarna möter mekaniskt motstånd. För tillväxtprocesserna och för att cellerna skall erhålla osmotiskt verksamt substans fordras assimilat, växtnäringsämnen och syre. Ju bättre växtnäringsstillståndet är och ju intensivare fotosyntesen är desto snabbare tillväxt är naturligtvis möjlig även för rötterna och desto större motstånd kan dessa övervinna. Det har visats, att om syreförsörjningen försämras, så går inte bara rötternas tillväxthastighet ner utan också deras förmåga att övervinna ett mekaniskt motstånd (Håkansson, 1983). För majsrötter visade Gill & Miller (1956) att om syrehalten i den luft som omger rötterna understiger 10 %, minskar tillväxthastigheten starkt liksom det maximala motstånd som kan övervinnas. Även Hopkins & Patrick (1969) har visat hur jordpackning och syrgasinnehåll i marken samverkar i påverkan på rotpenetrationen.

2.9 Jordarten.

Olika jordarter har olika förmåga att magasinera vatten och bjuder skilda mekaniska motstånd. Jordens förmåga till aggregering beror på den mekaniska sammansättningen och jordens inne-

håll av organiskt material.

Sandjordarna är torkkänsliga på grund av ett litet rotdjup och dålig vattenhållande förmåga. Rotsystemet på en sandjord utvecklas i det övre mullrika lagret på grund av den större vattenbindande förmåga som det organiska materialet ger jorden. En djupare rotutveckling försvåras av ett kraftigt mekaniskt motstånd.

Mojorden utgör ur markfysikalisk synpunkt en idealisk jordart. Mojordarnas kornstorlek garanterar gynnsamma porositetsförhållanden även om aggregatstrukturen är svagt utvecklad. Den växttillgängliga vattenkapaciteten är medelgod, men den kapillära vattenledningsförmågan är god. Möjligheterna för en bra genomrotning på djupet är goda.

En typisk mjälajord innehåller 50-70% mjälamaterial och 15-30% ler. Mjälajordar har en svag struktur med tendens till igenslammning, flytning, vattenerosion och skorpbildning. Mjälajordar har en hög vattenhållande kapacitet men har mestadels en massiv struktur som gör den rotovanlig.

Lerjordarna har många speciella egenskaper, som varierar med lerhalten och typ av lermineral. Massiv lerjord är ogenomsläpplig och den naturliga genomsläppligheten är betingad av sprickor, maskhål, rotkanaler o dyl. Leran krymper vid upptorkning och skapar därmed breda och djupa sprickor. Den vattenhållande förmågan är stor men större delen av vattnet är hårt bundet och oupptagbart för växterna. Lerjordar har en stabil aggregatstruktur och risken för igenslammning är liten. En lerjord som inte är packad erbjuder växterna goda möjligheter till en god rotutveckling.

Man talar ofta om att vissa växtarter trivs på t.ex. lerjordar och andra på lättare jordar, typ sandjordar. Detta kan bero på att växten på respektive ståndort kan utveckla ett för växten optimalt rotsystem eller att växten funnit sin ekologiska nisch, d v s har en god konkurrenskraft gentemot andra arter.

Hur ett trädets rotsystem utvecklas beror som visats tidigare på en mängd faktorer. Det är svårt att förutse hur en art kommer att utvecklas. Många studier har gjorts av rotsystem av skilda växtslag och arter men jordarten indikerar bara vissa egenskaper hos jorden. Jordens tillstånd vid undersökningstillfället och även en tid tillbaka är högst väsentligt för att förstå rotutvecklingen på en specifik växtplats.

3 PACKAD MARK.

3.1 Konsekvenser för växten.

När en lucker jord packas så trycks i första hand de grova porerna samman och jordens volym minskar. Ju högre trycket är desto finare blir det återstående porsystemet. Desto sämre blir också vattengenomsläppligheten och dräneringen, desto lägre blir jordens luftinnehåll och desto mer hämmas rottillväxten, figur 3.1.



Figur 3.1. Ligusterplanta som vuxit i en jord med ett packat skikt 25 cm under markytan. Plantan uppgrävd 20 år efter plantering i ett småhusområde på en moränlera.

Markpackningen orsakas framförallt av överfarter av fordon och maskiner, men även av packningsmaskiner och djurs och människors tramp. Anrikning av Natrium-joner från vägsalt ger skador i marken som gör att strukturen bryts ned.

Markpackning är ingen isolerad skadefaktor utan tillsammans med andra orsaker påverkar den trädets och buskars utveckling. Packningen ger skador i marken som sekundärt inverkar på växten.

Packningens inverkan på mark och vegetation i stadsmiljö kan ses på två sätt. Ett är de skador som åstadkoms på redan etablerad vegetation, när växtplatsen på något sätt packas. Ett annat är när marken redan är packad när växten planteras. Detta kan vara på en byggarbetsplats (figur 3.2) eller när man planterar träd på ytor som medvetet packats för en tidigare användning som väg, parkeringsplats eller dylikt. Här görs i regel endast ett hål i den tidigare beläggningen, grovt bärlagermaterial tas bort och gropen fylls med planteringsjord. Denna är lucker men gropens väggar har skild textur och struktur, vilket gör att rötternas tillväxtutrymme begränsas till en för liten jordvolym.

Packningen orsakar en minskning av porvolymen i marken. Detta ger



Figur 3.2. På byggarbetsplatsen körs det i regel utan tanke på framtida markanvändning.

minskad genomsläpplighet för vatten, mindre mängd växttillgängligt vatten och det minskar växtens näringsupptagning.

Packningen minskar gasutbytet i marken vilket ger en minskning av rotandningen, försämrar levnadsbetingelserna för mikroorganismer och ger en anrikning av toxiska ämnen. Minskningen i mikrobiell aktivitet ger en försämrad uppbyggnad i marken av stabila mullämnen, en inskränkning i kvävemineraliseringen, sämre levnadsbetingelser för rotmykorrhiza genom syrebrist och sekundärt får marken därigenom en sämre struktur.

Förtätningar i marken kan antingen vara genetiskt betingade eller orsakade av körningar. På jordar med hög ler- och mjälahalt, som har förtätade lager, växlar perioder med överskott och brist på vatten. Dräneringen försvåras genom att vattnet måste rinna i sidled ovanpå det förtätade lagret fram till ett mer genomsläppligt område. Under torkperioder står ett relativt litet vattenförråd till växternas förfogande och rotsystemet blir svagt utvecklat.

För t ex ett gatuträd kan detta ge konsekvenser för trafiksäkerheten i form av nedfallande grenar eller att hela träd faller genom att viktiga rötter dör och förankringen i marken blir sämre.

Symptom hos träd vid en packningsskada.

1. Arttypiskt för små blad
2. Färre blad än normalt
3. Gulnande blad och bladfall
4. Glesare krona
5. Grendöd som börjar med de perifera fina grenarna
6. Svag tillväxt och avsevärd mängd torrved
7. Sekundärsymptom genom sämre vitalitet (svamp och parasitangrepp)

3.2 Packningsprocessen i marken.

Vid momentan belastning av en punkt på markytan uppstår i markprofilen påkänningar, som kan ge upphov till både elastiska rörelser och kvarstående deformationer, vilkas omfattning är beroende av belastningens storlek och de rådande förhållandena i profilen. I marken finns ett antal porer, sprickor och hålrum av olika storlek, från några tiotusendels millimeter till en eller flera centimeter. Ju mindre porerna är desto större är deras hållfasthet mot yttre påkänningar. De för dränering och luftutbytet viktiga makroporerna, (större än 0,03 mm, enligt definition av Eriksson et al, 1974) hör till de svagare. I en normal markprofil finns sålunda en fördelning av porer med olika hållfasthet mot mekaniska påkänningar. Även om man inte kan utläsa förändringar i porvolym så sker fullt mätbara elastiska rörelser ner till en meters djup även vid förhållandevis små belastningar - två till fyra tons axeltryck.

Då marken belastas av ett hjul uppstår tryck- och skjuvspänningar i profilen som utsätter porerna för påkänningar. När hjulet rullar, ökar först påkänningarna successivt till ett maximum i ett visst avsnitt av marken och avtar sedan samtidigt som "angreppsriktningen" ändras, då hjulet passerar.

De skjuvspänningar som uppstår kan resultera i små inbördes förskjutningar av partiklar och aggregat, kvarstående deformation, och därmed förändringar av markens egenskaper. På grund av spänningar och vibrationer kan dessutom material, genom tyngdkraften, flyttas nedåt i profilen (vertikal erosion).

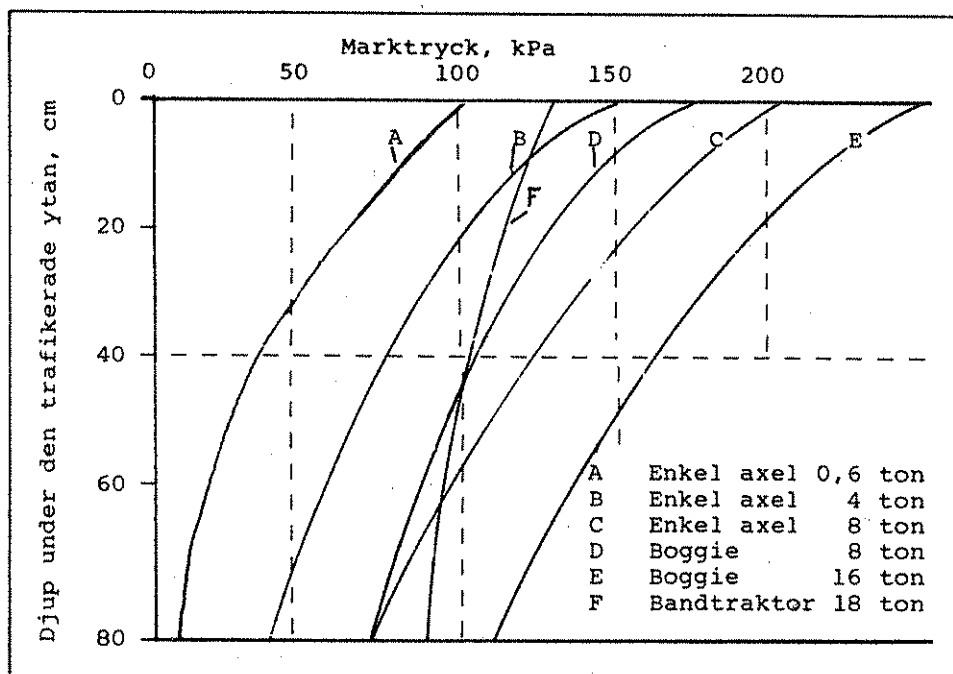
Är jorden redan packad vid ett visst tryck, så kan den ånyo utsättas för detta tryck utan att packas ytterligare, om vattenhalten och därmed packningskänsligheten inte har ändrats. Trycket måste dock ligga på under en viss tid för att packningen skall hinna avslutas. Vid ett så kortvarigt tryck som när ett hjul från ett fordon med normal körhastighet passerar hinner inte packningen avslutas (Håkansson, 1985). Upprepade överfarter ger därför succesivt ökande packning, även vid ett stort antal överfarter.

En ökning av körhastigheten resulterar i mindre påverkan på marken (Danfors, 1977). Marken utsätts för belastning under en kortare tid. Denna förbättring kan bli reducerad eftersom tunga fordon och maskiner kan komma i gungning när de körs fort. Även vid körning på ojämn mark utsätts denna för ökade dynamiska påkänningar genom att fordonet då kommer i gungning.

Vid ett kortvarigt tryck bestäms packningens omfattning av fuktigheten i marken. Packningen uppvisar ett maximum vid en viss vattenhalt. Under denna vattenhalt begränsas packningen av jordens bärighet (när vattenhalten minskar, ökar hållfastheten) och packningskänsligheten minskar. Vattenhalten och därmed årstiden och jordarten är av stor betydelse för packningskänsligheten.

Olika axel- och hjul-utrustningar ger skilda trycktillskott till marken. Figur 3.3 visar en teoretisk uppskattning av trycktillskottet på olika djup i marken. Figuren illustrerar totallastens betydelse för packningsskador även på djupet. Boggiefordon ger mindre påkänningar i marken och mindre packning ner till 30 - 50 cm djup än enaxlade fordon. På större djup är total-

belastningen mer utslagsgivande än totaltrycket i ytan för påkänningarnas storlek. Porvolymen och luftgenomsläppligheten minskar i mätbar omfattning ner till 50-60 cm djup vid stora belastningar. Ännu efter åtta år kvarstod packning i alven, som orsakats av upprepad körning med 16 ton på boggie (Håkansson, 1985).



Figur 3.3. Diagrammet illustrerar en teoretisk uppskattning av trycktillskottet på olika djup i marken. Det visar totallastens betydelse för packningsskador även på djupet. (ur Nyström, 1986)

Lägre lufttryck i däckerna ger lägre specifikt marktryck, vilket i första hand minskar påkänningarna och packningen i de övre delarna av marken. Med hänsyn till de mycket växlande förhållandena som kan råda i fråga om jordarter och framförallt vattenhalter kan man inte dra någon exakt gräns för den belastning som åstadkommer djupgående och bestående packningsskador. De ytliga skadorna är relativt lätta att åtgärda mekaniskt men när axelbelastningen är högre än 6 ton blir skadorna mer djupgående oavsett marktrycket. Vid normal fuktighet i marken bör inte däckstrycket överstiga 80 - 100 kPa (Danfors, 1977). Ett högre marktryck ger skador eftersom det grova porsystemet börjar brytas ned.

Bland de maskiner och fordon som används på och kring en byggarbetsplats finns flera som ger stora trycktillskott till marken. En lastbil kan ha däckstryck på upp till 800 kPa och en hjullastare som har ett relativt lågt axeltryck obelastad får när den körs med full last i skopan en väldigt stor belastning på främre axeln. Figur 3.3 visar en att en tung bandtraktor ger ett relativt litet trycktillskott i ytan och borde rimligtvis inte packa marken speciellt mycket. Banddrivna maskiner ger emellertid ett stort vibrationstillskott till marken som gör att de stabila porerna lättare bryts ner och. Maskinerna ger även en ojämn tryckfördelning på konstruktionen med rullar innanför banden.

Det fordras upprepad tjälning och uttorkning för att förändringar i marken på grund av kraftig packning skall försvinna. Dessa

naturliga processers intensitet tillsammans med den biologiska aktiviteten är störst vid markytan och större på lerjordar än på lättare jordar. På lerjordar kan de naturliga processerna inom några år luckra ett lager på ett par dm djup. På lättare jordar ger frost och torka inte någon sprickbildning och luckring alls och där kan en packning bli permanent.

4. DJUPLUCKRING.

4.1. Mål.

Djupluckring genomförs framförallt för att förbättra vatten- och lufthushållningen i marken. Detta medför en ökad mängd växttillgängligt vatten, en förbättrad genomrotning och att jorden får en ökad bearbetbarhet. Bearbetningen måste vara så omfattande att den verkligen åtgärdar de faktorer som är skadliga för växterna (stående vatten, mekaniskt motstånd, syrebrist osv) och har en varaktighet så att de naturliga processerna i marken ånyo får verka som de skall. Ett annat viktigt mål med en djupluckring är att öka andelen makroporer för att därigenom öka genomsläppligheten för luft och vatten.

4.2. Jordar i behov av luckring.

En jord som har någon slags förtätad horisont behöver luckras. Det kan röra sig om en plogsula när man skall etablera växter på gammal jordbruksmark eller det kan vara en mer omfattande och djupgående skada som orsakats av trafik med tunga fordon och maskiner på en byggarbetsplats. Packningsgraden är troligen högre i urbana jordar än i jordbruksmark.

Det behöver inte bara vara mekaniskt packade jordar som är i behov av djupluckring. Jordar med speciella geologiska bildningar kan också vara i behov av t ex en förbättrad genomsläpplighet. Det kan röra sig om profiler med lerlager över en genomsläpplig grund som en parabrunjord som karakteriseras av en leranrikning i A_3 -horisonten, se figur 4.1, med genomsläpplig jord i C-horisonten. Luckring kan även behövas på jordar med lager där genomsläppligheten är god men där det mekaniska motståndet hindrar en djupare rotutveckling. Det kan röra sig om sandskikt eller jordar med ortstensförekomst.

Brunjord	Podsol	Sumpjord	
L (= A_{00})	L (= A_{00})	L (= A_{00})	L Förna (ingår i S-skiktet)
	F	F	A Urlakningshorisont
	A_0	A_0	A_0 Mår (indelas i F-skikt och H-skikt)
	H	H	
A	A_1 A_2 A_3	A_1	A_1 Humusblandad mineraljord A_2 Blekjord A_3 Övergångsskikt i huvudsak av blekjordskaraktär. Saknas ofta.
			A/B Övergångshorisont
A/B	B	B_1 G	B Anrikningshorisont B_1 Mörkbrunt, humusrikt skikt som återfinns i järnhumus- och humuspodsoler.
B		B_2	B_2 Rostjord B_3 (B/C) Övergångsskikt
	B_3 etc		G Av grundvattnet påverkad horisont
C	C	C	C Av markprocesserna föga påverkad jordart
D	D	D	D Berggrunden

Figur 4.1. Jordmanshorisonter. (ur Troedsson & Nykvist, 1973)

Utbytet av en djupluckring hänger mycket samman med jordarten. Leriga jordar bryts bättre upp på sin polyederstruktur än lättare, siltiga jordar. Även varaktigheten av luckringen är bättre hos en tyngre än hos en lättare jord.

Den jord som har de sämsta strukturbildande egenskaperna är mjälajorden. Jordpartiklarna har en svag attraktion till varandra och stor rörlighet i vatten vilket ger tendens till igenslammning, flytning och vattenerosion. I mjälrika jordar blir en luckring föga framgångsrik, ibland t o m skadlig, eftersom bearbetningen kan förstöra de få naturliga porer och sprickor som finns. Den kapillära vattenstigningen är mycket effektiv vilket gör att jordarna har hög vattenhållande förmåga och detta tillsammans med tidigare nämnda egenskaper gör att en humusfattig mjälajord snabbt återtar sin massiva struktur efter en bearbetning. En alvluckring är i och för sig välbehövlig men har endast en kortvarig verkan och är därmed inte ekonomiskt försvarbar.

4.3. Marktillståndet vid luckringen.

När det gäller all luckring måste man beakta följande faktorer:

- * vattenhalten i jorden vid bearbetningstillfället
- * det fackmässiga genomförandet
- * utrustningens ändamålsenlighet
- * kapaciteten på redskapen man använder
- * dränering, när grundvattenytan står för högt
- * vattenhalten i jorden vid efterföljande markarbeten (beakta risken för återpackning)
- * att ytan planteras eller besås snarast, så att växterna hjälper till med upptorkningsförloppet

En effektiv och intensiv uppluckring av marken kan bara fås när jorden är väl upptorkad. Vattenhalten i marken skall ligga mellan utrullgränsen och vissningsgränsen eftersom aggregaten bara har en tillräcklig stabilitet i uttorkat tillstånd. En djupbearbetning med mekanisk alvluckrare kan endast ge positiv effekt om den utföres efter en längre torkperiod eftersom marken måste vara uttorkad ner till bearbetningsdjup. Extremt uttorkad mark är emellertid inte bra då dragkraftbehovet därigenom blir onödigt stort.

När en jord är bearbetbar på djupet är svårt att säga. Inom lantbruket finns möjligheten på hösten när växtligheten torkat ut marken. I urbana sammanhang ligger jorden oöväxt kanske i flera år, det dränerande spricksystemet är förstört och det är alltså endast genom avdunstning som marken avger sitt vatteninnehåll. Eftersom uttorkningen måste ske till det djup som skall bearbetas kan detta ta mycket lång tid.

Vid luckringen bryts den torra, packade marken upp och aggregaten förskjuts i förhållande till varandra och omlagras till viss del och det bildas oregelbundna sprickor och hålrum. Detta gör att marken inte återgår till ursprungstillståndet när luckringsredskapet passerat.

Om jorden är för torr, bryts den i stora klumpar i stället för små aggregat. Mellan dessa stora klumpar bildas önskat stora hålrum vilket försämrar den vattenhållande kapaciteten. Risken för att jorden skall vara för torr är dock betydligt mindre än

att den skall vara för fuktig.

4.4. Luckringsresultat.

Håkansson (1976) summerar de svenska resultaten från djupbearbetningsförsök, som är resultat erhållna med mekanisk alvluckring med stela svärd, och konstaterar att de positiva utslagen överväger men påpekar också att vissa försök lagts ut på platser där man av olika anledningar förväntat positiv effekt. Där framgång kan förväntas är där man genom bearbetningen kan bryta lager som förhindrar rötternas framträngning, såsom mjäla- och sandskikt, vissa pappersgyttjelager och ortsten. Beskrivningarna av försöksplatserna är i vissa fall mycket knapphändiga varför resultaten kan vara svåra att tolka.

Edling et al (1969) rapporterar om alvluckringsförsök på skånsk moränlera. På dessa jordar fann man inga positiva effekter, ej heller några negativa. Skälen till att dessa liksom många tidigare försök, rapporterade av Nilsson och Henriksson (1968), genomsnittligt inte givit några positiva tendenser anses vara tre:

1. Försök har utförts på platser utan luckringsbehov.
2. Djupbearbetningen har inte medfört någon luckring.
3. Luckringen har inte varit stabil.

I de skånska försöken användes en engelsk alvluckrare med arbetsorgan som var 5 cm breda och 30 cm långa och bildade i arbetsläge ca 15° mot horisontalplanet. Även i en del andra försök har använts utrustning där skäret haft samma vinkel.

Enligt Schulte-Karring (1985) är detta för flackt för att marken skall brytas upp och han anser även att ett 5 cm brett skär är för smalt. Detta kan vara en förklaring till att bearbetningarna inte givit någon luckringseffekt.

I flera tyska undersökningar har man visat positiva resultat med alvluckrare på jordbruksmark. Martinovic (1982) redovisar i en litteraturstudie resultat som visar på större porvolym, bättre vattenhållande egenskaper, ökad genomsläpplighet och bättre genomrotning. Skilda undersökningar har dock även fått negativa svar på alvluckrares djupluckrande effekt varför resultatet av en alvluckring mycket hänger samman med marktillståndet och vilket redskap som används.

Vid djupplöjning (omblandning av material) av sandjordar på möbotten och vid inplöjning av organiskt material i sandjordar har ofta goda resultat erhållits. På styvare jordar är resultaten växlande.

Varaktigheten av en alvluckring kan variera mycket kraftigt beroende på effekten vid bearbetningen, jordarten, lermineralens sammansättning, kalktillståndet, maskars och andra markorganismers påverkan samt jordens behandling efter alvluckringen. Ofta torde dock jorden relativt snabbt återgå till det skick den hade före luckringen p g a återpackning (Nilsson & Henriksson, 1968; Edling et al, 1969).

För att få en varaktig luckring bör den, enligt Martinovic (1982), kombineras med t ex dränering, kalkning, djuprotande växter samt en skonsam efterbehandling.

För att utröna de mikrobiologiska effekterna av djupluckring studerade Franz (1976) tre olika djupbearbetningsförsök. Djupluckringen som skett med olika typer av alvluckrare 2,5 , 11 och 13 år tidigare, studerades även med aspekten att utröna långtidseffekterna av luckringen. Jorden som luckrats 2,5 år före undersökningen visade en klart högre mikrobiologisk aktivitet i det luckrade ledet, speciellt på det djup där alvluckrarens skär gått fram. De ytor som luckrats tidigare hade tappat denna effekt och det hade alltså skett en återpackning.

Borchert & Graf (1981) redovisar resultaten från en långtidsundersökning av 28 djupluckringsförsök. Resultaten studerades utifrån förändringar i torra skrymdensiteten, porvolym och mängden luftfyllda porer. Från tredje året efter luckring avtog effekterna av luckringen. Dålig varaktighet av luckringen kan korreleras med hög silthalt, låg lerhalt, ett lågt pH och avsaknad av dränering.

Meimberg (1967) konstaterar en större andel grövre porer 4 år efter luckringen. Han har också påvisat en försämrad struktur när luckringen utförts under ogynnsamma förhållanden.

Alla refererade försök är utförda på jordbruksmark där:

1. Återpackning sker genom ytan åter trafikeras med samma fordon som orsakat den tidigare packningen.
2. Packningsskadan är mindre än vid markbyggnad i stadsbruket.
3. Endast mekanisk alvluckring har använts.

4.5. Luckringsmetoder.

Genom en detaljstudie av markprofilen och dess fysikaliska och kemiska egenskaper, kan man fastställa om det finns horisonter som kan hämma växternas utveckling. Med dessa kunskaper som grund kan man sedan välja sättet för en djupbearbetning. Det är viktigt att luckringen utförs ned till en nivå under den packade horisonten. I det följande kommer tre olika djupbearbetningsmetoder att närmare beskrivas, mekanisk luckring med alvluckrare och med grävmaskin samt pneumatisk luckring med tryckluft.

I Tyskland har de senaste åren presenterats en hel del utrustning för luftning av marken vid träd i gatu- och parkmiljö. Flera av dessa rena luftningsutrustningar angriper inte orsakerna till trädens dåliga kondition utan endast symptomen och är endast en tillfällig medicin för träden.

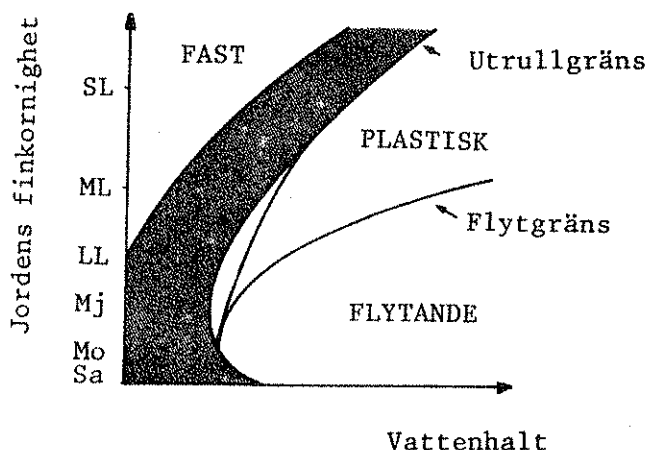
4.5.1. Luckring med mekanisk alvluckrare.

Oavsett vilket redskap som används, så måste alvluckringen ske då jorden är väl upptorkad till det djup, som skall bearbetas. Detta är en förutsättning för att man skall få en luckring och sönderdelning av det bearbetade skiktet. Det går inte att ange någon speciell vattenhalt som gränsvärde då detta varierar med jordart, men marken måste vara så uttorkad att jorden ger så stort motstånd mot skärtrycket att lyftkraften mot markytan förmår bryta upp marken. Den får inte ge efter, då förfelas hela luckringen man får motsatt verkan. Under och eventuellt överliggande lager trycks samman och man får en igensmetning av det befintliga porsystemet.

Upptorkningen på våren eller efter en regnperiod sker först genom att det fria vattnet leds via spricksystemet i marken till grundvattenytan eller till ett dräneringssystem. Därigenom uppnår man s k fältkapacitet, d v s ett tillstånd då endast de kapillära porerna innehåller vatten. Sedan fortsätter upptorkningen genom avdunstning. Först därefter är en lerjord bearbetbar.

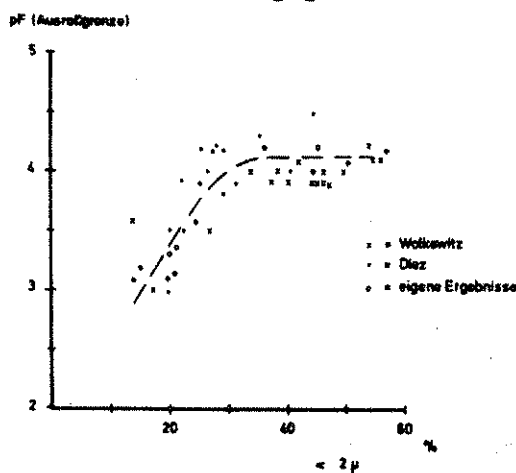
Beroende av ler- och vattenhalt är jorden mer eller mindre plastisk. En djupbearbetning i en plastisk jord som inte är tillräckligt upptorkad ger bara ett spår i marken som resultat och tillståndet har snarare försämrats än förbättrats.

Ur vattenhaltssynpunkt kan man skilja på tre olika konsistensformer - en fast, en plastisk och en flytande. Icke plastiska jordar har därvid två konsistensformer - en fast och en flytande med en så kallad flytgräns, som skiljer dem åt. Hos plastiska jordar finner man emellertid tre olika konsistensformer. Mellan den fasta och flytande formen förekommer en plastisk konsistensform, som avgränsas genom en flytgräns och en utrullgräns. Se figur 4.2.



Figur 4.2. Diagram visande jordens konsistensformer. Bearbetning skall ske inom det mörkfärgade området.

Figur 4.3 visar sambandet mellan lerhalt och pF-värdet vid utrullgränsen. Med ökande lerhalt kommer vattnet att bindas hårdare och vid lerhalter på 35-40 % närmar sig vattenhalten vid utrullgränsen den permanenta vissningsgränsen.



Figur 4.3. Sambandet mellan lerhalt och pF-värdet vid utrullgränsen. (ur DVWK, 1985)

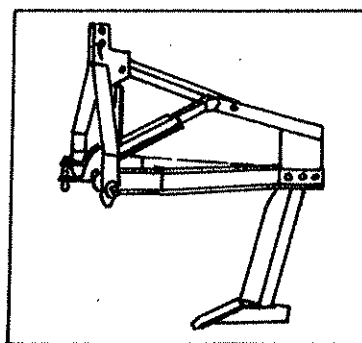
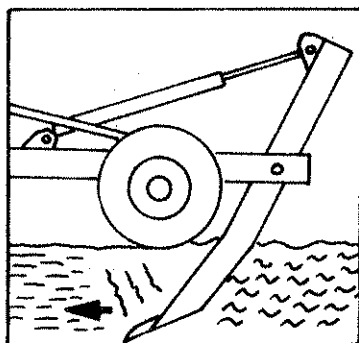
I tabell 4.1 visas en del markfysikaliska resultat av luckring med en mycket kraftig alvluckrare av typ 'stechhubblockerer'. Bearbetningen gjordes när marken befann sig i rätt fuktighets-tillstånd för optimal luckring.

Tabell 4.1. Alvluckrings (stechhubblockerer) inverkan på porvolym, andelen porer >0,05 mm, torra skrymdensiteten, skjuvmotståndet mätt med vingborr och genomsläppligheten för vatten. Luckringen är utförd 1979 och värdena är medelvärden för 3 olika jordar undersökta 1980. (efter Martinovic, 1982)

Parameter	Djup cm	Luckrat led	obehandlat led
Porvolym	0- 30	48,9	46,3
(vol-%)	30- 50	49,4	42,1
	50- 70	48,8	41,0
	70-100	43,3	39,6
Porer >0,05 mm	0- 30	13,5	10,5
(vol-%)	30- 50	14,9	6,6
	50- 70	11,8	5,6
	70-100	8,9	4,0
Torr skrymdensitet	0- 30	1,44	1,53
(g/cm ³)	30- 50	1,47	1,64
	50- 70	1,47	1,66
	70-100	1,69	1,69
Skjuvmotstånd	0- 30	320,0	310,0
(cm x kp)	30- 50	276,6	980,0
	50- 70	153,3	1086,6
	70-100	1260,0	1296,6
Vattengenomsläppl.	0- 30	91,7	55,7
(kf cm/s x 10 ⁻⁴)	30- 50	93,5	10,2
	50- 70	94,9	4,9
	70-100	4,9	0,7

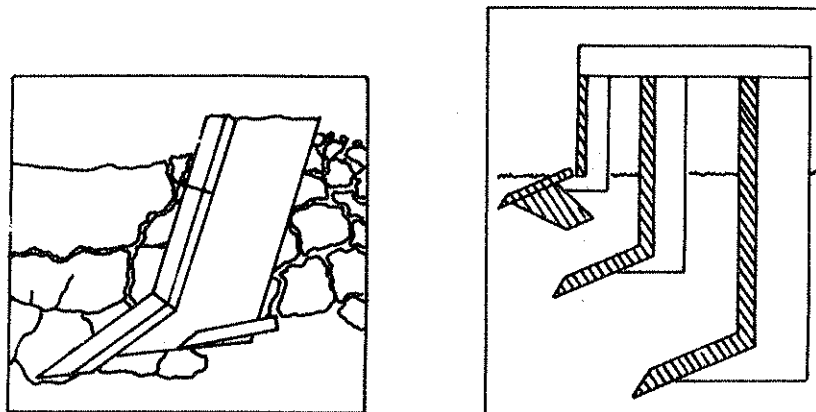
Olika typer av alvluckrare.

Det finns två principiella arbetssätt för alvluckrare. Med stelt eller rörligt redskap.



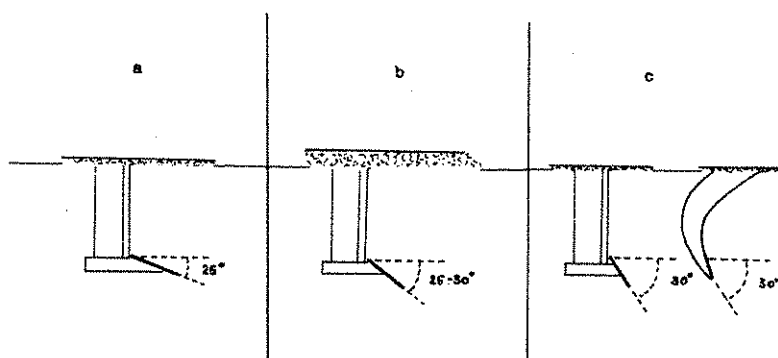
Figur 4.4. Alvluckrare med stelt svärd. Till vänster hjulburen och till höger traktorburen.

Det stela redskapet är det ursprungliga och är antingen bogserat eller buret (Figur 4.4) av en hjul- eller banddriven traktor. Detta redskap består av ett svärd som längst ner har ett skär. Det är skäret som står för det egentliga arbetet i marken och har till uppgift att lyfta jorden framåt - uppåt. Skärets utformning har varierat från enkla plattjärnsliknande skär till mer gåsfotsliknande och även svärdet har försetts med flera skär eller "vingar" på sidorna, figur 4.5.



Figur 4.5. Exempel på arrangemang av svärd och vingar hos alvlu krare.

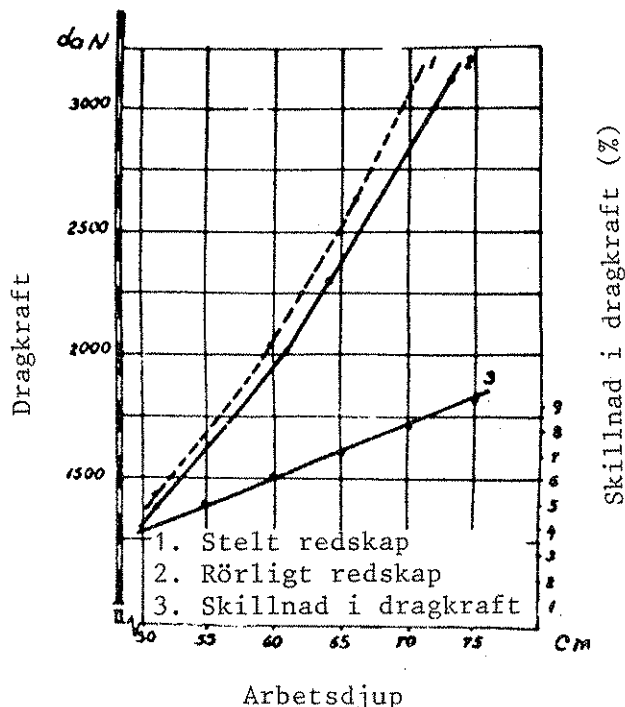
Skäret har bästa luckringseffekt när det ligger i $25-30^\circ$ vinkel mot horisontalplanet (figur 4.6). Ett för flackt ställt skär bryter upp marken för dåligt och ett för tvärt ställt gör att dragkraftbehovet blir mycket stort (Schulte-Karring, 1985). Skärets förmåga att bryta jorden är också beroende av utformning och storlek. För små skär luckrar dåligt och medför en större risk för att det bara bildas ett "rör" i marken. Schulte-Karring (1985) menar att skäret bör vara 100x300 mm eller något större. En möjlighet att byta skär på svärdet är bra då utrustningen därmed kan anpassas efter skilda förhållanden.



Figur 4.6. Vinkeln på skäret har stor betydelse för intensiteten på luckringen. Bäst effekt får man när vinkeln är $25 - 28^\circ$. (ur Schulte-Karring, 1985)

Stela luckringsredskap har i jämförelse med de rörliga ett mycket större dragkraftbehov (figur 4.7). Dessutom åstadkommer ett stelt redskap en mindre omlagring av aggregaten vilket är en nackdel för luckringens varaktighet. Fördelen med de stela redskapen är bl a lägre anskaffningskostnader.

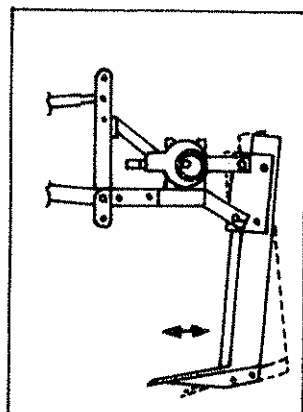
Under 1960-talet utvecklades i USA en utrustning med flera svärd som var rörliga i sidled och erhöill därmed en avsevärd minskning i dragkraftbehov. Luckringseffekten var emellertid inte tillfredsställande och det visade sig att på fuktiga finjordsrika marker kunde utrustningen t o m åstadkomma en ökad packning. Idén om rörliga delar för att minska dragkraftbehovet var emellertid väckt och utvecklades senare.



Figur 4.7. Diagram som visar skillnaden i dragkraftsbehov mellan ett stelt och ett rörligt redskap. (ur Toma, 1982)

När man använder ett stelt redskap så måste all effekt överföras till marken via traktorhjulen. För att få ett bättre kraftutbyte av traktorn som bär eller drar redskapet, utvecklades redskap där de arbetande delarna är rörliga via kraföverföringsaxeln. Motorns effekt fördelas därmed mellan hjul och kraftuttag.

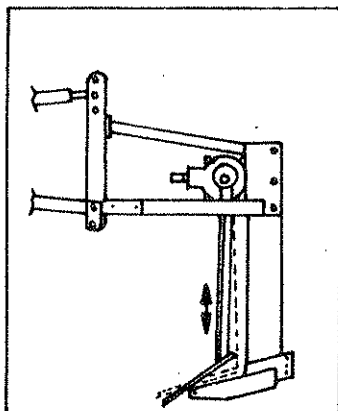
"Hubschwenklockerer"



Den i Tyskland först utvecklade utrustningen var en 2-armars "hubschwenklockerer", figur till vänster, där svärderna satt med samma avstånd som spårvidden på traktorn. Hela svärdet med skär har en fram- och tillbakagående rörelse där ett skär går framåt när det andra går bakåt. Till skillnad från utrustning med andra rörelsemönster är denna utrustning känslig för större stenar och starkt uttorkad mark. 80 % av effekten ligger på kraftöverföringen och det enda överbelastningsskyddet som finns är en vanlig smatterkoppling. Ett annat problem, som för övrigt gäller de flesta alvluckrare är att bibehålla arbetsdjupet. Som regel saknas tryckhydraulik på traktorn som behövs för att hålla nere redskapet.

Denna typ av alvluckrare har ett arbetsdjup på maximalt 55 cm och med skär på 400x80 mm behövs en dragkraft på ca 37 kW. För en 4-armars luckrare är dragkraftbehovet 50-80 kW.

"Wippscharlockerer"

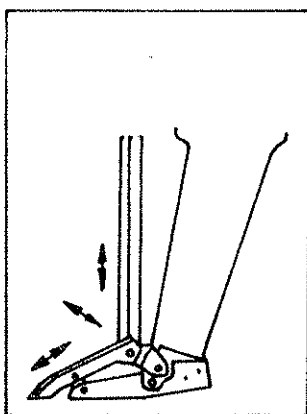


Till skillnad från tidigare nämnda utrustning är arbetet med "wippscharlockerer", figur till vänster, mindre problematiskt. Med sitt stela svärd behöver den bara använda 30 % av förbrukad effekt via kraftuttaget, så att 70 % av den erforderliga effekten ligger på hjulen i form av dragkraft. Luckringsarbetet är tack vare det större skäret bättre och det är mindre svårt att hålla arbetsdjupet. Tack vare att en mindre kraftinsats behövs för rörelsen är det lättare att övervinna större motstånd.

Denna typ av alvluckrare finns som en- och två-armars. En luckrare med bara ett skär har den nackdelen att man är tvungen att köra på redan luckrad mark, eftersom endast halva spårvidden luckras.

Med ett relativt stort skär på 500x150 mm med ett arbetsdjup på 80 cm behövs en tillgänglig effekt på 60 till 80 kW. Med två skär med 170 cm avstånd är behovet 95 till 110 kW.

"Stechhublockerer"



Denna typ av luckrare, figur till vänster, som är en vidareutveckling av den förra är mycket kraftig. Den har ett 550x200 mm stort skär som går i en rörelse framåt och sedan uppåt. Utrustningen finns med upp till 3 skär och lämpar sig bäst för stora, kraftigt packade ytor.

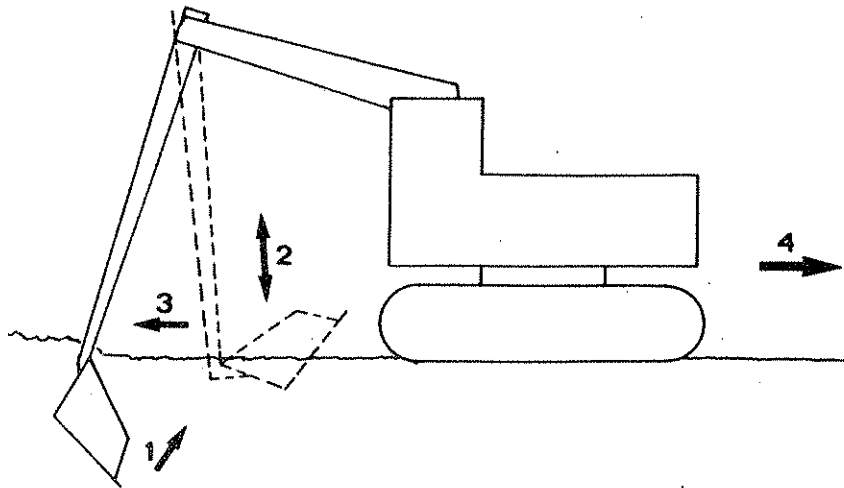
Effektbehovet för arbete på 90 cm djup är minst 100 kW och utrustningen skall användas på banddrivna maskiner.

Fördelarna med denna maskinkombination är en bättre luckringseffekt genom stora skär och en genom tryckhydraulik bättre möjlighet att erhålla önskat arbetsdjup.

Utrustningen är dyr och lämpar sig endast till stora rekultiveringsobjekt. Skall endast en plogsula brytas upp finns andra mer ekonomiskt försvarbara utrustningar.

4.5.2. Luckring med grävmaskin.

Denna metod går ut på att med en grävmaskin eller traktorgrävare, som står på den packade marken och arbetar sig bakåt, lyfta upp en jordvolym som skakas lätt, och sedan släpps ner i hålet igen (figur 4.8). Jorden vänds inte utan faller i stort sett tillbaka som den låg, men packade skikt har brutits upp och sprickor har bildats.



Figur 4.8. Maskinens principiella arbetssätt vid luckringen.

1. Skopan körs ner till tänkt luckringsdjup
2. Skopan lyfts och skakas
3. Jorden släpps tillbaka i hålet
4. Maskinen backar

Luckring med grävmaskin har framgångsrikt utförts i fruktodlingar i USA (Harris, 1983) och försök har även gjorts på jordbruksmark i Sverige. Håkansson (1976) rapporterar om betydelsefulla effekter på vattenhushållningen, även om detta är en mycket komplex fråga som är beroende av hur genomgripande luckringen är, av nederbörds-, avdunstnings- och dräneringsförhållanden mm. I svårgenomsläppliga jordar kan man förvänta sig positiva effekter.

Rolf (1986) har studerat en planteringsyta som behandlats med grävmaskin. Resultaten visar på att luckringen har haft flera positiva effekter som större porvolym, makroporerna utgör en större andel av porsystemet vilket har ökat genomsläppligheten för vatten och gett bättre förutsättningar för gasutbytet i marken. Dessa markfysikaliska förändringar har också kommit till uttryck i en bättre tillväxt hos det planterade växtmaterialet som utgörs av i Sverige vanliga busk och trädarter.

Kostnaden för behandlingen av den av Rolf (1986) beskrivna planteringsytan var 1984 ca 1.25 kr/m^2 då arbetet utfördes på ett ca 10000 m^2 stort område.

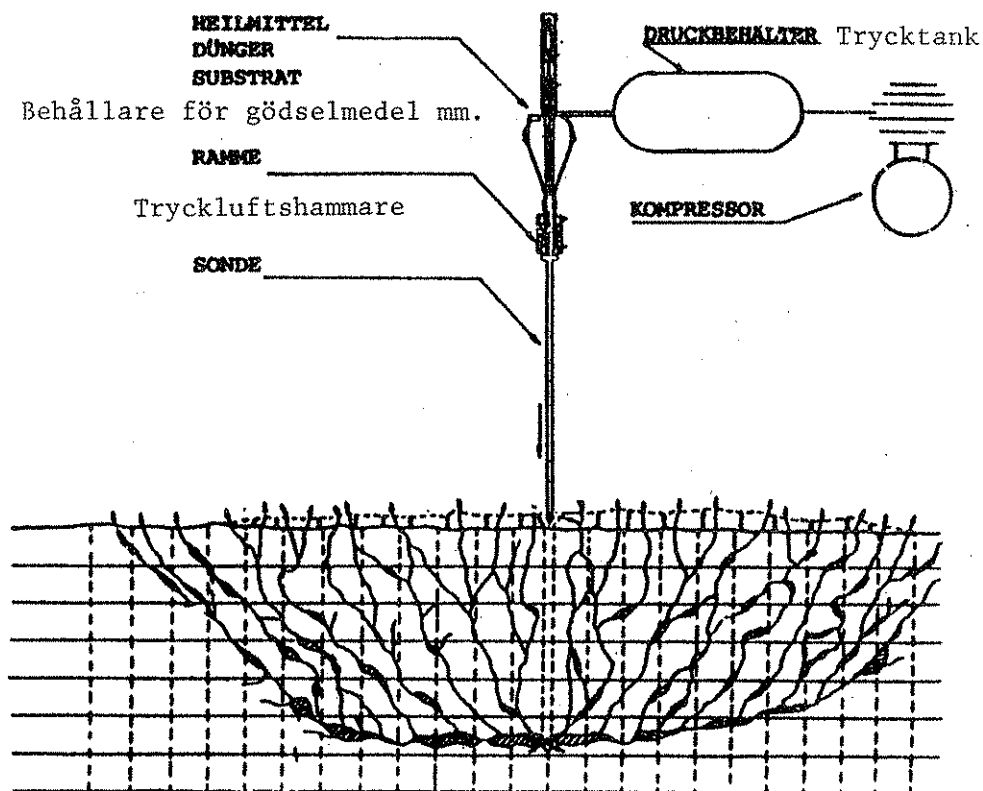
De av Håkansson (1976) beskrivna luckringarna har utförts med matjorden avtagen medan luckringen beskriven av Rolf (1986) utfördes efter det att matjorden var påförd. Vilket tillvägagångssätt som än används så kommer en viss mängd matjord att fylla upp de sprickor som bildas under luckringen. Dessa utgör därmed utmärkta rotvägar eftersom jorden är lucker och kan

genom det organiska inslaget hålla ett gott näringstillstånd.

4.5.3. Luckring med tryckluft.

Luft i marken, och då menas luft med högsta möjliga syrgasinnehåll är lika nödvändigt för växten som vatten. Tanken att använda mediet luft som vertyg för att bearbeta marken är intressant. I motsats till vatten är luft komprimerbart. Tack vare denna egenskap kan luft användas som en tämligen obegränsad energipotential. I luft är markpartiklarna inte rörliga d v s de bildar inte med luft någon suspension och förmår följaktligen inte förstöra aggregatstrukturen. Vatten är sämre ägnat åt detta då vatten löser upp markpartiklarna och bildar en suspension som kan sätta igen porer.

Sedan ett par år tillbaka finns utrustning tillgänglig för pneumatisk behandling av mark. Utrustningen, med produktnamnet 'Terralift', består av en marksond, en tryckluftshammare och en kompressor, se figur 4.9. Sonden slås med hjälp av tryckluftshammaren ner i marken, trycket byggs upp i en tryckluftstank och släpps sedan explosionsartat ut genom öppningar längst ner i sonden.



Figur 4.9. Schematisk bild av tryckluftsbehandling. (Efter Nitschke et al, 1986)

Verkan av denna tryckluftssprängning breder ut sig cirkulärt kring sonden med en diameter av ca 1,2 m. Vid en luckring till 90 cm djup måste två bearbetningar göras, först en på ungefär 50 cm djup och därefter en med sonden på maximalt djup. 'Terralift' frigör 500-1000 liter luft, med ett relativt högt tryck på 16-20 bar, på bråkdelen av en sekund.

Via en behållare kan "jordförbättringsmedel" tillföras marken

samtidigt med luftstöten. Detta kan vara kalk eller 'styroperl', små plastkulor, för att stabilisera det nya spricksystemet eller gödselmedel till träd eller buskar.

Vad händer när man släpper ut tryckluft i marken via en sond? Tryckluften träffar den omgivande jorden vid öppningen och gasmolekylerna studsar, på grund av markmotståndet som verkar på gasmolekylerna. Det uppkomna trycket gör att luften infiltrerar eller diffunderar genom marken. Gasmolekylerna går enligt minsta motståndets väg till markytan och atmosfären.

Om sprickor och porer i marken finns i tillräcklig mängd så kommer luft som tillsätts vid ett visst tryck att försvinna ut i atmosfären utan att påverka markstrukturen. Här gäller dock att trycket måste vara så lågt att luftvägarna hinner dränera bort luften. Om man däremot injicerar luft med ett högt tryck så kommer luften att utvidga de porer som finns för att utjämna trycket.

De krafter i marken som verkar mot tryckluften bestäms framförallt av jordart, struktur och markens aktuella fuktighetstillstånd.

Nitschke et al (1986) har via tidsstudier försökt att få en bild av tidsåtgång och kostnader för djupbehandling med 'Terralift'. Kostnaderna är avhängiga hur starkt packad marken är eftersom det tar längre tid att slå ner sonden i en mer packad mark. Flyttningen av utrustningen är också tryckluftsdriven men tidsåtgången påverkas av den som utför jobbet.

Med en viss variation, beroende på vem som utför jobbet, fås tidsåtgången enligt tabell 4.2. Siffrorna baseras på behandling av stora träd, där det görs 64 stick på en yta av 10 x 10 meter, runt varje träd. I en normalt packad mark tar det 1,54 minuter för varje stick om den tid ingår som går åt att fylla på jordförbättringsmedel.

Tabell 4.2. Arbetskraftstimmar / 500 träd för arbete med 'Terralift' vid skilda markförhållanden (ur Nitschke et al, 1986)

Akh / 500 träd	
Normalpackat	944
Mycket packat	1410
Sprängning på 2 nivåer	1454

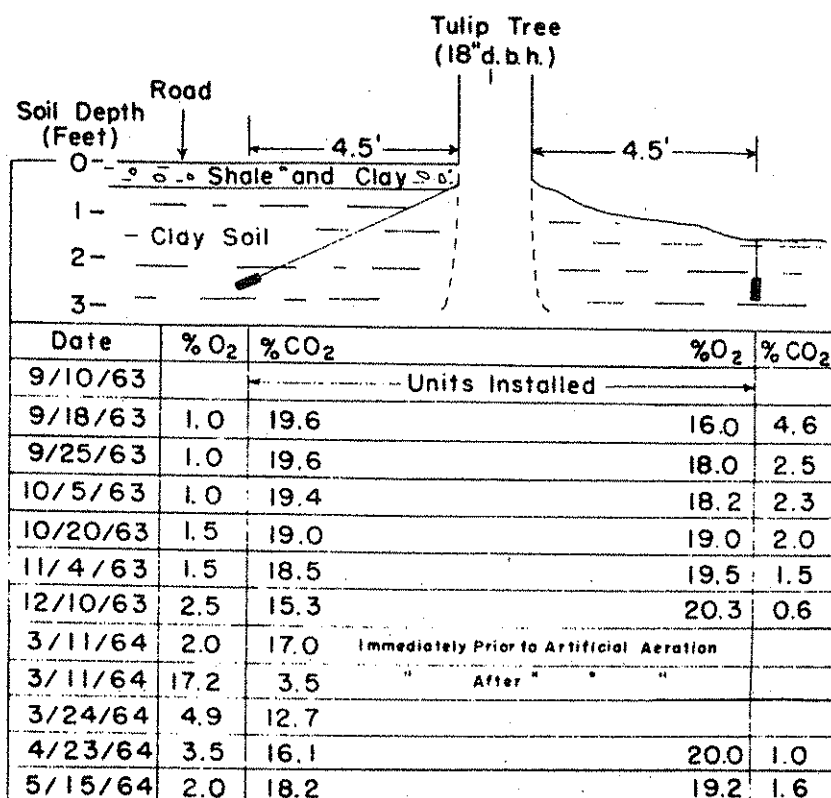
För att beräkna kostnaderna räknar man med en årlig användning på 800 timmar och en avskrivningstid på 8 år. I siffrorna som presenteras i tabell 4.3 ingår driftskostnader och en lönekostnad på 37:- DM/timme, som är ungefär 127,65 SEK (1:- DM = 3,45 SEK).

När marken är vattenmättad har det visat sig svårt att injicera styroperl. Achilles (1980) menar att ett så lätt material inte kan transporteras genom ett uppslammat medium.

Tabell 4.3. Kostnad / träd för behandling med 'Terralift'
(ur Nitschke et al, 1986)

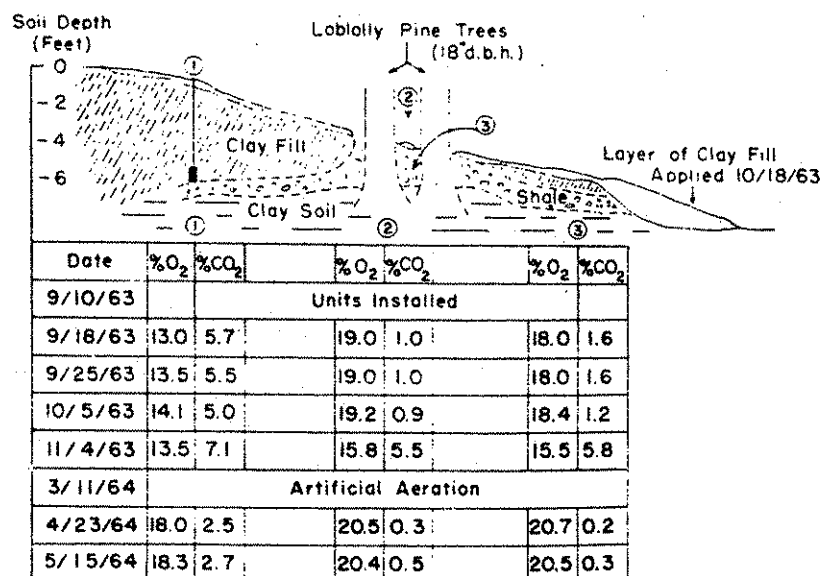
Normalpackat	94,50 DM	326:- SEK
Mycket packat	139,54 DM	481:- SEK
Sprängning på 2 nivåer	143,86 DM	496:- SEK

Yelenowski (1964) rapporterar om experiment gjorda i början på 60-talet med tryckluftsbehandling av träd. Man borrade 60-90 cm djupa hål, 5 cm i diameter, i vilka luft under högt tryck injicerades. Figur 4.10 visar att effekten under en nybyggd väg var mycket kortvarig, mestadels på grund av att marken snabbt återpackades genom trafiken på vägen. Det nya grova porsystemet var inte stabilt nog. Större framgång hade man i ett annat försök som framgår av figur 4.11 där ingen trafik återpackade marken genom vibrationer. Resultaten visar att positiva effekter av tryckluftsbehandling kan fås på ytor som inte, efter behandling, upprepat utsätts för svår packning.



Figur 4.10. Syrgas och koldioxid koncentrationer under en nybyggd väg som går strax intill ett tulpanträd och över en stor del av dess rötter. (ur Yelenosky, 1964)

Martinovic (1982) menar i sin jämförande studie av pneumatisk och mekanisk luckring att pneumatisk luckring kommer, när utrustningen är väl utprovad, att utgöra ett värdefullt redskap för ytor som är små eller svåråtkomliga för annan teknik. Tabell 4.4 visar resultat från hennes undersökning som gjordes på en prototyp till 'Terralift' och luckringen utfördes när markförhållandena inte var de bästa.



Figur 4.11. Syrgas och koldioxid koncentration i jord vars yta blev täckt med krossmaterial innan lera fylldes på runt trädstammarna. (ur Yelenosky, 1964)

Tabell 4.4. En tryckluftsbehandlings inverkan på porvolym, andelen porer >0,05 mm, torra skrymdensiteten, skjuvmotståndet mätt med vingborr och genomsläppligheten för vatten. Luckringen är utförd 1979 och värdena är medelvärden för 3 olika jordar undersökta 1980 (efter Martinovic, 1982)

Parameter	Djup cm	Luckrat led	obehandlat led
Porvolym	0- 30	48,7	46,3
(vol-%)	30- 50	46,1	42,1
	50- 70	44,1	41,0
	70-100	43,5	39,6
Porer >0,05 mm	0- 30	12,5	10,5
(vol-%)	30- 50	11,9	6,6
	50- 70	7,2	5,6
	70-100	7,7	4,0
Torr skrymdensitet	0- 30	1,45	1,53
(g/cm ³)	30- 50	1,53	1,64
	50- 70	1,55	1,66
	70-100	1,60	1,69
Skjuvmotstånd	0- 30	306,6	310,0
(cm x kp)	30- 50	740,0	980,0
	50- 70	773,3	1086,6
	70-100	993,3	1296,6
Vattengenomsläppl.	0- 30	108,0	55,7
(kf cm/s x 10 ⁻⁴)	30- 50	25,7	10,2
	50- 70	9,2	4,9
	70-100	4,9	0,7

DISKUSSION

Träd och buskars behov av syre, vatten och näringsämnen i rätt mängd måste vara utgångspunkten för all slags jordbearbetning på djupet. För att kunna utföra en riktig markbehandling är det viktigt att känna till och förstå vilka krav rötterna hos vedartade växter har. Rotutvecklingen är intimt förknippad med de förhållanden som råder i marken

En djupbearbetning med en viss teknik vid en viss tidpunkt ger ett bestämt resultat. Om denna inte ger en förbättring i markens gasutbyte, vattenhushållning, vattengenomsläpplighet mm så är det meningslöst att utföra behandlingen. Att avgöra vilken metod och utrustning som är den rätta vid en viss tidpunkt för en viss jord är svårt och kräver kunskap om mark och växter som få i Sverige besitter.

Packningens negativa effekter kan angripas på flera sätt:

A. Genom att minimera körning på blivande vegetationsytor.

Att minimera körningen och endast begränsa den till blivande hårdgjorda ytor är mycket svårt när man, som idag, ofta bygger mycket tätt med minimala ytor mellan husen. All mark måste utnyttjas för att maskinerna över huvud taget skall komma fram. Har man kört på blivande vegetationsytor under olämpliga förhållanden en gång, är skadan i regel redan skedd.

En skonsam åtgärd är att använda maskiner med ett lägre axeltryck och speciella däck, med lägre lufttryck. Detta gör att kapaciteten på maskinerna som används blir lägre vilket höjer byggkostnaderna.

Kunskap och förståelse för vad som sker i marken och vilka konsekvenser det ger för växterna hos fordonsförare och andra som arbetar med anläggning och underhåll av grönytor är en nödvändighet för att komma ifrån onödiga skador i marken.

B. Genom att begränsa skadans omfattning.

Genom att körning sker på ett utlagt material som avlastar den blivande markytan. Detta förfaringssätt kan användas på ytor där man inte kan använda rekultiveringsteknik pga ledningar o dyl i marken, men där körning är nödvändig.

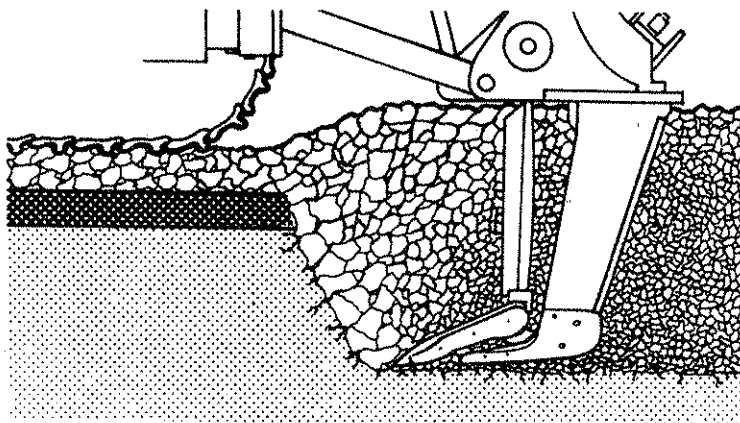
C. Genom att åtgärda uppkomna packningsskador.

Genom att använda en ändamålsenlig luckringsteknik går det att åtgärda packningsskador. Resultat från skilda undersökningar har visat att det finns metoder för varje speciell situation, svårigheten är att avgöra vilken som är lämplig.

Förstudien har visat att användning av alvluckrare är mindre lämpligt i stadsbruket då denna metod endast ger ett tillfredsställande resultat inom ett smalt vattenhaltsområde i marken. Det stora dilemma är när marken är för blöt. För att marken skall kunna bearbetas, måste den torka upp till bearbetningsdjup, men det gör den inte eftersom packningsskadan gör att genomsläppligheten är för dålig. Det blir en kretsgång som är svår att lösa. I byggskedet går det ofta inte att vänta in rätt marktillstånd för

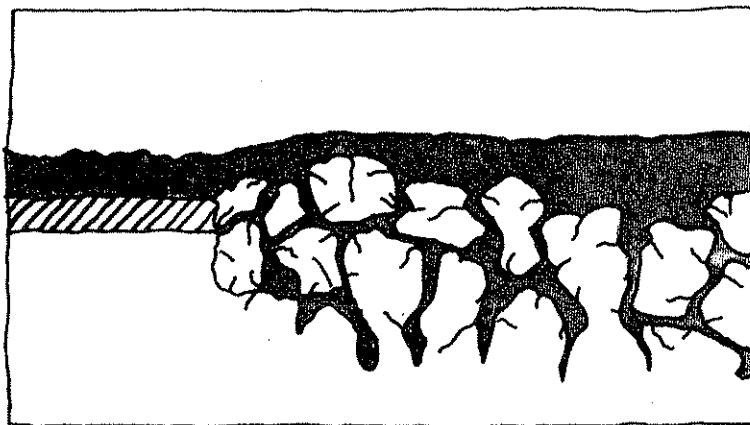
att bearbeta. Varje process i bygget skall ske inom en viss tidsram, vilket gör att utsikterna att nå ett bra resultat med mekanisk alvluckring ter sig tämligen små.

Vidare kräver alvluckrare i regel stora dragkrafter och att rätt typ av luckrare används till rätt jordart och marktillstånd. Alvluckrare kräver relativt stora ytor och en stor kunskap om marken hos användaren. Rätt utförd ger behandling med alvluckrare säkert ett bra resultat enligt intentionen i figur 5.1.



Figur 5.1. Principskiss på resultatet av mekanisk alvluckring under optimala förhållanden (ur Martinovic, 1982). Figuren är mer en 'reklamteckning' än en verklig beskrivning av förhållandet efter en mekanisk alvluckring. Resultatet torde snarare vara som i figur 5.2.

Endast ett fåtal resultat finns idag tillgängliga om grävmaskinsluckring. Luckringens karaktär blir annorlunda, det är framförallt vattengenomsläppligheten som ökar, genom de stora sprickor och hålrum som bildas. Det bildas ingen uttalad aggregatstruktur genom luckringen utan stora klumpar med oluckrat material ligger mellan de strängar av matjord som fallit ner i sprickorna. Hur stora dessa klumpar blir hänger samman med vattenhalten vid luckringstillfället och jordarten. Figur 5.2 är ett försök att illustrera resultatet och det skiljer sig en del från figur 5.1. Den viktigaste skillnaden mellan mekanisk alvluckring och grävmaskinsluckring är att den senare troligtvis ger större genomsläpplighet oavsett vattenhalten i marken och går därför att genomföra när det passar in i byggprocessen.



Figur 5.2. Principskiss på resultatet av en luckring med grävmaskin

Grävmaskinsbehandlingen ger en primärluckring dränerar profilen och gör att stående ytvatten försvinner och ger därmed förutsättningar för de biologiska processerna att komma igång och återställa jorden i ett tillstånd som är mer lämpligt för växtligheten. Metoden skall användas före plantering och lämpar sig till alla typer av ytor som behöver luckras.

Tryckluftstekniken är relativt ny och endast kortsiktiga resultat finns idag, de flesta från undersökningar gjorda efter behandling med en prototyp till 'Terralift'. Dessa visar på tillväxtökningar hos behandlade träd. Den långsiktiga effekten kan ej bedömmas än men det kan bli problem med att få en stabilisering av det makroporsystem som bildas vid behandlingen. Detta är ett problem med all slags djupluckring. Utsätts marken ånyo för tung trafik, kommer den att återpackas.

Genom att använda tryckluftsteknik kan gatuträd och andra etablerade växter med otillfredsställande markfysikaliska förutsättningar ges en chans att utvecklas, få bättre motståndskraft mot gatusalt och ges en ökad livslängd.

Olika markbehandlingsresultat måste hela tiden ställas till vegetationens krav. Det är emellertid svårt att mäta växternas krav och det är därmed en långsiktig process att ta fram vilka parametrar som är viktiga att uppfylla. Studier av markens reaktioner på skilda behandlingar måste även innehålla studier av vedartade växters reaktioner så att utvecklingen av gamla och nya metoder för markbehandling verkligen kommer växten till nytta.

PROJEKTETS FORTSÄTTNING

Genom att utveckla metoder som åtgärdar eller begränsar skadorna i marken, dels vid nyanläggning, dels i befintliga anläggningar, kan en för växterna bättre markfysikalisk miljö skapas. Grundorsaken till den dåliga tillväxten är främst en dålig rotmiljö som skapats i anläggningsskedet. Åtgärdas denna, nås en bättre vegetationsutveckling. Projektet vill undersöka vilka möjligheter luckring, med grävmaskin och med tryckluft, har att förbättra markförhållandena där marken är så packad att vegetationsutvecklingen inte kan ske enligt uppsatta mål.

Bra luckringsmetoder behövs för att anläggningar skall utvecklas enligt beställarens uppsatta mål och kunna skötas till en lägre årlig kostnad och för att den totala produktionskostnaden för byggnad och mark skall bli lika med dagens eller lägre. Det är viktigt att flera olika metoder finns så att det till varje enskild situation finns användbara alternativ.

Vidare vill projektet undersöka vilka möjligheter det finns att skydda underliggande mark genom att bygga upp körytor ovanpå den mark vi vill skydda. Detta kan ske med t ex avbanad matjord som sedan skall användas i anläggningen eller utgöras av andra material som senare kan användas i markbyggnationen.

Förstudien har även gett oss insikt i ett speciellt angeläget område mycket nära förknippat med packningsproblematiken och det är gatuträdens levnadsmiljö. Den yttre påverkan som träden utsätts för i form av salt, avgaser, mekanisk åverkan mm kan trädet endast klara om det ges en bra rotmiljö. Ett friskt träd är mer motståndskraftigt. Det planeras och planteras för närvarande många stora träd i vår stadsmiljö men kunskapen om vad trädet måste ha för markförhållanden är bristande. Den största delen av dessa träd planteras i en hårdgjord miljö som ursprungligen preparerats för trafik och ej som rotmiljö och därtill kommer störningar i form av ledningar och dess underhåll. Det behövs en specificering av stadsträdets krav (minimikrav) på anläggning, jordvolym, näringsbehov mm.

REFERENSLITTERATUR

- Achilles, A. 1980. Bodenbearbeitung durch Druckluft. Landtechnik 3, 105-106.
- Bakker, J.W., & Hidding, A.P. 1970. Influence of soil structure and air content on gas diffusion in soil. Neth. J. Agric. Sci. 18, 37-48.
- Borchert, H. & Graf, R. 1981. Über die Erhaltung der Tieflockerung. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 22, 268-273.
- Brady, N.C. 1974. The nature and properties of Soils. 8th ed. 639 s. New York: Macmillan Publishing Co.
- Chang, H.T. & Loomis, W.E. 1945. Effect of carbondioxide on absorption of water and nutrients by roots. Plant Physiol. 20, 221-232.
- Craul, P.J. 1985. A description of urban soils and their desired characteristics. J. of Arboriculture 11 (11), 330-339.
- Danfors, B. 1977. Jordpackning - hjulustrustning. Jordbruks- tekniska institutet. Meddelande 368.
- Drew, M.C. and Saker, L.R. 1975. Nutrient supply and the growth of seminal root system in barley II. Localized, compensatory increases in lateral root growth and rates of nitrate uptake when nitrate supply is restricted to only part of the root system. J. Exp. Bot. 26, 79- 90.
- DVWK, 1985. Die gefugemelioration durch Tieflockerung - Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse. DVWK schriften 70. 270 s. Hamburg: Verlag Paul Parey.
- Edling, P., Nilsson, N.M., Håkansson, I. 1969. Sju skånska försök med alvluckring och djupplöjning 1964-68. Lantbrukshögskolan. Rapporter från jordbearbetningen Nr 19.
- Eriksson, J.; Håkansson, I.; Danfors, B. 1974. Jordpackning- markstruktur- gröda. Jordbrukstekniska institutet, Meddelande nr 354. Uppsala.
- Eriksson, J. 1982. Markpackning och rotmiljö. Packningsbenägenheten hos svenska åkerjordar. Förändringar i markens funktion orsakade av packning. Sveriges lantbruksuniversitet. Inst. för markvetenskap, avd. för lantbrukets hydroteknik, Rapport 126.
- Franz, G. 1976. Der Einfluss der Tieflockerung von Pseudogleyen auf die Bodenorganismen und die Beständigkeit dieser Meliorationsmassnahmen. Ldw. Forschung 29, H.1, 77-87.
- Gill, W.R. & Miller, R.D. 1956. A method for the study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20, 154-157.
- Gable, A.R. 1966. Soil Aeration and plant growth. Adv. Agron. 18, 57 -106.

Harris, R.W. 1983. Arboriculture, care of trees, shrubs and vines in the landscape. 688 s. London: Prentice-Hall Inc.

Harris, D.G. & van Bavel, C.H.M. 1957. Nutrient uptake and chemical composition of tobacco plants as effected by the composition of the root atmosphere. *Agron. Journal* 49, 176-181.

Head, G.C. 1969. The effects of fruiting and defoliation on seasonal trends in new root production on apple trees. *J. Hort. Sci.* 44, 175 - 181.

Heinonen, R. 1983. Specifika styrningsfaktorer för rotutvecklingen. Roten och rotens miljö II. Sveriges lantbruksuniversitet. Konsulentavdelningens rapporter, Allmänt 47, 49-53.

Hoeks, J. 1972. Effect of leaking natural gas on soil and vegetation in urban areas. *Agric. Res. Rep.* 778. Wageningen.

Hopkins, R.M. & Patrick Jr, W.H. 1969. Combined effect of oxygen content and soil compaction on root penetration. *Soil Science* 108, 408-413.

Håkansson, I. 1976. Elva försök med alvluckring och djupplöjning i syd- och västsverige 1964-1975. Lantbrukshögskolan. Rapporter från jordbearbetningen Nr 42.

Håkansson, I. 1983. Fysikaliska betingelser för rotutvecklingen i odlade jordar. Roten och rotens miljö II. Sveriges lantbruksuniversitet. Konsulentavdelningens rapporter, Allmänt 47, 13-21.

Håkansson, I. 1985. Jordpackning inom trädgårdsområdet och den gröna sektorn. Vilka erfarenheter kan överföras från jordbrukets försöksverksamhet. Sveriges lantbruksuniversitet. Konsulentavdelningens rapporter, Trädgård 287, 16a:1-6.

Jackson, M.B. & Drew, M.C. 1984. Effects of flooding on growth and metabolism of herbaceous plants. I *Flooding and plant growth*, Ed. Kozlowski, T.T. New York: Academic Press, Inc.

Kozlowski, T.T. 1949. Light and water in relation to growth and competition of Piedmont forest tree species. *Ecol. Monogr.* 19, 207 -231.

Kozlowski, T.T. 1971. Growth and Development of Trees. Volym II. 514 s. New York: Academic Press, Inc.

Kozlowski, T.T. 1984. Flooding and plant growth. New York: Academic Press, Inc.

Kozlowski, T.T. 1985. Soil aeration, flooding and tree growth. *Journal of Arboriculture* 11, nr 3, 85-96.

Kramer, P.J. 1969. Plant and Soil Water Relationships: A modern Synthesis. New York: McGraw - Hill.

Labanauskas, C.K., Stolzy, L.H., Klotz, L.J. & Dewolfe, T.A. 1971. Soil oxygen diffusion rates and mineral accumulations in citrus seedlings. *Soil Science* 111, 386-392.

Lees, J.C. 1972. Soil aeration response to drainage intensity in basin peat. *Forestry* 45, 135-143.

Leone, I.A., Flower, F.B., Arthur, J.J., & Gilman, E.F. 1977. Damage to woody species by anaerobic landfill gases. J. of Arboriculture 3, nr 12, 221-225.

Lemon, E.R. 1962. Soil aeration and plant root relations. I. Theory. Agron. Journal 54, 167-170.

Letey, J., Stolzy, L.H., Blank, G.B. & Lunt, O.R. 1961. Effect of temperature on oxygen-diffusion rates and subsequent shoot growth, and mineral content of two plant species. Soil Science 92, 314-321.

Letey, J., Stolzy, L.H. & Blank, G.B. 1962a. Effect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. Agron. Journal 54, 34-37.

Letey, J., Stolzy, L.H., Valoras, N. & Szuszkiewicz, T.E. 1962b. Influence of oxygen diffusion rate on sunflower growth at various soil and air temperatures. Agron. Journal 54, 316-319.

Martinovic, Lj. 1982. Einfluss von mekanischer und pneumatischer Tieflockerung des Bodens auf Gefuge, Wasserdynamik, Wurzelentwicklung und Ertrag bei drei Bodentypen. Diss., Bonn.

Meimberg, R. 1967. Die Wirkung von Untergrundlockerung und Maulwurfdränung auf den Wasserhaushalt verdichteter Böden. Bayrisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 44, Sonderheft 3, 55-61.

Nilsson, T. 1975. Rotfunktion och rotmiljö. Lantbrukshögskolan. Konsulentavdelningens stencilserie. Trädgård 92. Alnarp.

Nilsson, N.M. & Henriksson, L. 1968. Alvluckringsförsök 1937-1963. Lantbrukshögskolan. Rapporter från jordbearbetningen Nr 12.

Nitschke, S., Schockert, K. & Rohlfing, H.-R. 1986. Terralift - Bodenlockerungsverfahren. Neue Landschaft 31, 501-504.

Nyström, P. 1986. Upptäck packningsskadorna och åtgärda dem! Utemiljö, 2. s 9-15.

Patterson, J.C. 1976. Soil compaction and its effects upon urban vegetation. Better trees for Metropolitan Landscapes Symposium Proc. USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. NE-22, 91-102.

Perry, T.O. 1982. The ecology of tree roots and practical significance thereof. J. of Arboriculture 8, nr 8, 197-211.

Richards, D., & Cockroft, B. 1974. Soil physical properties and root concentrations in an irrigated apple orchard. Austral. J. Exptl. Agric. and Husb. 14, 103-107.

Richardson, S.D. 1953. Studies of root growth in *Acer Saccharinum* L. II. Factors affecting root growth when photosynthesis is curtailed. Proc. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam C56, 346 - 353.

Richardson, S.D. 1957. Studies of root growth in *Acer Saccharinum* L. VI. Further effects of the shoot system on root growth. Proc. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam C60, 624 - 629.

Rolf, K. 1986. Packning och packningsskador i urban miljö. - En markfysikalisk undersökning av en planteringsyta. Stad och Land, Nr 50.

Rosen, C.J., & Carlsson, R.M. 1984. Influence of root zone oxygen stress on potassium and ammonium absorption by Myrobalan plum rootstock. Plant and soil 80, 345-353.

Ruark, G.A., Mader, D.L., & Tattar, T.A. 1982. The influence of soil compaction and aeration on the root growth and vigour of tress - A litterature review. Part 1. Arboricultural Journal 6, 251-265.

Russel, E.W. 1973. Soil conditions and plant growth. 10th Edition. 849 s. London: Longman.

Schulte-Karring, H. 1985. Einsatz und auswirkung des Ahrweiler Meliorationsverfahrens in verdichteten Böden unter besonderer berücksichtigung des Gemüse-, Obst- und Wienbau. Die gefugemelioration durch Tieflockerung - Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse. DVWK schriften 70. 139-265. Hamburg: Verlag Paul Parey.

Toma, D. 1982. Methods and equipment for deep loosening of soil. AGRI/MECH Report 95.

Troedsson, T., & Nykvist, N. 1973. Marklära och markvård. 403 s. Stockholm. Almqvist & Wiksell. 94-95.

Wiersum, L.K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and soil 9, nr 1, 75-85.

Yelenosky, G. 1964. Tolerance of trees to deficiencies of soil aeration. Int. Shade Tree Conf. Proc. 40, 127-147.

Youngberg, C.T. 1970. Soils and tree growth requirements. Ur Management of yong-growth Douglas-fir and western hemlock. Oregon State Univ. Sch. For., 34-37.

LITTERATUR

Andersson, S. 1952. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. I. Marken som ett fysikaliskt system. Grundförbättringar 1952:4, s.1-12.

Andersson, S. 1953. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. II-V. Om markens permeabilitet. Grundförbättring 1953: 1-4, s 28-45, s 74-89, s 160-176, s 217-234.

Berben, J.C. 1972. Influence of soil compaction and precipitation on root and stem growth by several species of trees. Agricultura 20 (3), 129-148.

Böhm, W. 1979. Methods of studying root systems. 241 s. Berlin: Springer-Verlag.

De Kimpe, C.R., Bernier-Cardou, M., & Jolicoeur, P. 1982. Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil-water properties. Can. J. Soil Sci. 62, 165-175.

Heinonen, R. 1975. Jordarterna och deras brukningsegenskaper. Lantbrukshögskolans meddelanden B23.

Håkansson, I. 1966. Försök med olika packningsgrader i matjorden och alvens översta del. Grundförbättring 1966:4.

Ljungars, A. 1977. Olika faktorerers betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. Mätningar 1974 - 76. Sveriges lantbruksuniversitet. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen 52.

Müller, U. 1980. Untersuchungen über die Tieflockerung und ihre praktischen Ergebnisse zur Rekultivierung von mechanisch verdichteten Böden. Schweizer Ingenieur und Architekt, 14/80, s 324-328.

Norell, M. 1983. Vegetationsutvecklingen i ett bostadsområde. Utemiljö, 4, 1983. s 10-11, 40-41.

Nyström, P. 1984. Lågprofildäck och lågt lufttryck skonar marken. Utemiljö, 1, 1984. s 6-7.

Olesen, S.E. 1977. Dyb jordbehandling på stukturödelagt lerjord. Ugeskrift för Jordbrug, 25, 504-506.

Schulte-Karring, H. 1980. Tieflockerung - Notwendigkeit und Möglichkeiten. Landtechnik, 3, 108-111.

Schulte-Karring, H. 1983. Technik und Anwendungsbereich der Untergrundlockerung. Landtechnik von morgen, 22, 59-66.

Schulte-Karring, H. 1983. Tiefenlockerung. KTBL - Arbeitblatt 203.

Sinn, G. 1980. Bodenverdichtung und oberbodenverluste. Neue Landschaft, 25, 912-914.

Zisa, R.P., Halverson, H.G., & Stout, B.B. 1980. Establishment and early growth of conifers on compact soils in urban areas. U.S. Forest service research paper NE-451.

Wiklander, L. 1976. Marklära. Uppsala. Lantbrukshögskolan.

Yelenosky, G. 1963. Soil aeration and tree growth. Int. Shade Tree Conf. Proc. 39, 16-25.

Øvig, J.K.; Hansen, B. 1983. Forsøg med retablering af strukturødelagt jord. Det danske hedeselskab, Forsøgsvirksomheden, Beretning nr 25, 1983.